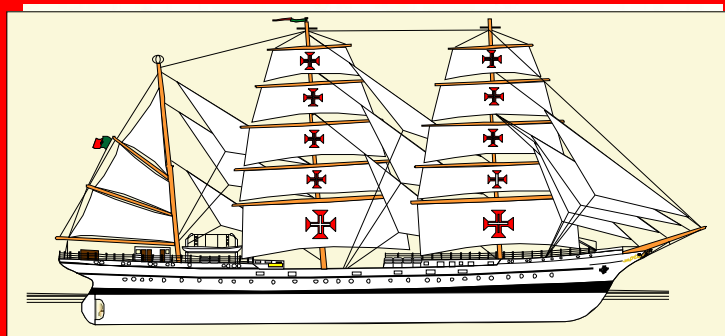


AUTOR:
Milton José Américo

*Sistema de Avaliação
da
Estabilidade Transversal
de Navios
em Tempo Real*



2009

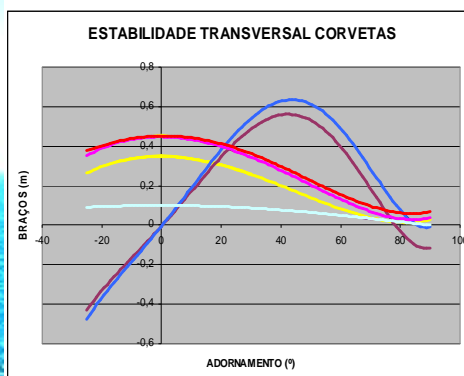
Autor:
M. J. Américo

*Sistema de Avaliação da Estabilidade
Transversal de Navios em Tempo Real*

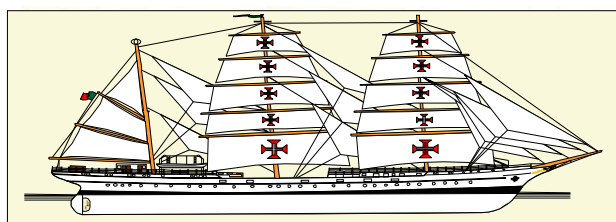
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciência dos Materiais



**“SISTEMA DE AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE
TRANSVERSAL DE NAVIOS EM TEMPO REAL”**



Milton José Américo

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade.

Orientador: Prof. José N. Marat Mendes.

Co-orientador: Prof. Paulo Inácio.

Lisboa

2009

AGRADECIMENTOS

O meu maior agradecimento é para o Prof. Marat Mendes e para o Prof. Paulo Inácio, que graças às suas orientações, disponibilidade, apoio e amizade permitiram que este trabalho chegasse a “bom porto”.

À Escola Naval, e em especial ao Departamento de Engenheiros Navais – ramo de mecânica, pela utilização do Tanque de Arquitectura naval, aonde se realizaram os testes com o modelo do casco de uma Corveta.

À Marinha, em geral, e aos navios em particular, pela ajuda, entusiasmo e ânimo demonstrados durante a realização dos testes nos navios.

Ao Eng. Rijo Carola pela disponibilização dos elementos de construção dos navios, pela sua amizade e boa disposição.

A todos os que de algum modo me ajudaram, um muito obrigado.

SUMÁRIO

A presente dissertação visa a aplicação dos conhecimentos adquiridos sobre estabilidade transversal estática de navios, conjugados com a análise dinâmica do comportamento do navio em mar regular, por intermédio da utilização de um inclinómetro de precisão e das equações matemáticas relacionadas com movimentos oscilatórios amortecidos livres e forçados, para a determinação das características do movimento do navio.

É nitidamente claro que a determinação da estabilidade de navios deve ser tratada de uma forma dinâmica. A dificuldade reside essencialmente na medição exacta do efeito das forças dinâmicas tais como o vento e a ondulação.

O objectivo principal deste trabalho consiste na obtenção de uma ferramenta expedita para a determinação, em tempo real, da condição de estabilidade transversal de navios, e com uma margem de erro pouco significativa.

Para tal, além do tratamento das medições dinâmicas no modelo e no navio, por intermédio do MatlabTM e folha de cálculo ExcelTM para a determinação dos factores de amortecimento e de estabilidade, foram utilizadas as curvas de estabilidade para as condições de carga mais usuais do navio, assim como as curvas hidrostáticas necessárias.

No final do trabalho são apresentadas folhas de cálculo em Excel para duas classes de navios, e do Navio-Escola Sagres, cujo objectivo consiste no traçado das curvas relacionadas com a estabilidade transversal em caso de embarque de pesos a bordo, e de alagamentos de determinados compartimentos do navio, com ou sem os efeitos do vento e da ondulação marítima, e respectiva comparação com os critérios de estabilidade transversal em vigor na Marinha.

SUMMARY

The aim of this thesis is the application of ship transverse statical stability knowledges, in conjugation with ship dynamic analysis in regular sea waves, through the use of a precision inclinometer and mathematics equations related with free and forced damped oscillatory movements, for ship movements characteristics determination.

Is very important, for the ship transverse stability determination, the use of dynamic analysis, but the main difficulty resides in the correct measurement of the dynamic forces such as the wind and sea undulation.

The principal purpose of this thesis consists in achieving a prompt tool, in real time, to calculate the instantaneous ship transverse stability condition, with a small error margin.

For that, besides the treatment of dynamic measurements (in the ship model, and in the real ship), with the use of MatlabTM and ExcelTM programs for damp and stability factors determination, it was necessary to use the ship stability and hydrostatic curves.

In the final part of this work it is showed some examples of two navy ship classes and tall ship Sagres, where are calculated the final transverse stability curves in case of loading weights and flooded compartments, with or without wind and sea waves action, and it is made a comparison with the actual security stability criterions.

LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÕES

I – Impulsão (ton_f);
P – Peso (N);
 P_{fd} - Peso do fluido deslocado (ton_f);
 V_{fd} - Volume de fluido deslocado (m^3);
 m_{fd} - Massa do fluido deslocado (Kg);
 ρ_{fd} - Massa volúmica do fluido deslocado (Kg/m^3);
g - Aceleração terrestre (m/s^2);
G - Centro de gravidade;
B - Centro do volume imerso (centro de impulsão);
W - Deslocamento do navio (ton_f);
L - Comprimento do navio (m);
B - Boca do navio (m);
d - Imersão média do navio (m);
WL - Linha de água (*water line*);
FP - Perpendicular avante (*forward perpendicular*);
AP - Perpendicular a ré (*after perpendicular*);
WPA - Área de flutuação (*water Plane Área*), (m^2);
Cw - Coeficiente de finura da área de flutuação;
CB - Coeficiente de bloco;
CM - Coeficiente da área a meio navio;
Cp - Coeficiente prismático longitudinal;
KG - Altura do centro de gravidade (m);
w - Peso transferido (N);
 GG_v - Deslocação vertical do centro de gravidade (m);
 GG_h - Deslocação horizontal do centro de gravidade (m);
KB - Altura do centro de impulsão (m);
GZ - Braço endireitante (m);
M - Metacentro transversal inicial;
GM - Altura metacêntrica (m);
 B_f - Força de impulsão (*Buoncy force*), (ton_f);
KM - Altura do metacentro (m);

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

BB₁ - Deslocação do centro de impulsão (m);

v - Volume deslocado de imersão (m³);

bb₁ - Distância entre os centróides dos volumes de imersão v (m);

BM - Raio metacêntrico (m);

I - Momento de inércia (2º momento) da área de flutuação (m⁴);

FSM - Momento do espelho líquido (*free surface moment*), (ton_f.m);

dt - Densidade do líquido (Kg/m³);

AVS - Ângulo de estabilidade nula (*angle of vanishing stability*), (°);

θ - Ângulo de adorno (°);

LCG - Posição longitudinal do centro de gravidade (m);

VCG - Posição vertical do centro de gravidade (m);

M - Momento inclinante (ton_f.m);

CLR - Centro de resistência lateral;

θ_1 - Ângulo de adorno permanente devido ao vento estável (°);

θ_3 - Ângulo de adorno dinâmico (°);

θ_f - Ângulo de imersão progressiva (°);

θ_{DEI} - Ângulo de imersão do convés (*angle of deck edge immersion*), (°);

IMO - “*Internacional Maritime Organization*”;

I_{w1} - Braço inclinante devido ao vento estável (m);

I_{w2} - Braço inclinante devido ao vento severo (m);

T - “*rolling period*” : Período de balanço (s);

PE - Energia Potencial (J);

KE - Energia Cinética (J);

I_m - Momento de inércia da massa do navio relativamente ao eixo longitudinal de oscilação (Kg.m²);

K - Raio de giração (m);

λ - Comprimento de onda (m);

V - Velocidade de propagação da onda (m/s);

x - Coeficiente do momento de inércia da massa virtual;

$d^2\phi/dt^2$ - Aceleração angular no movimento de balanço (rad/s²);

y - Coeficiente do momento de amortecimento;

$d\phi/dt$ - Velocidade angular (rad/s);

z - Coeficiente do momento de restituição;

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

ϕ - Deslocamento angular para o balanço (rad);

δ - Decremento logarítmico;

ξ - Factor de amortecimento;

ω_n - Frequência angular natural do navio (rad/s);

ω_a - Frequência angular de amortecimento do navio (rad/s);

A - Área do robalete (m^2);

r - Distância média entre a área do robalete e o centro de gravidade (m);

C - Coeficiente de pressão normal que actua no robalete;

ω - Velocidade angular (rad/s);

$(b/b_c)_0$ - Razão entre o amortecimento actual e o amortecimento crítico para um sistema linear;

A_{BK} - Área total do robalete (m^2);

w - Largura do robalete (m);

d - Distância entre o robalete e a mediatriz da figura de flutuação (m);

F_n - Número de Froude;

C_B - Coeficiente de obstrução;

MHS - Movimento harmónico simples;

MCU - Movimento circular uniforme;

x - Deslocamento linear (m);

v - Velocidade linear (m/s);

a_c - Aceleração centrípeta (m/s^2);

θ - Fase inicial (rad);

F - Força resultante (N),

L - Comprimento do pêndulo simples (m);

g - Módulo da aceleração gravitacional local (m/s^2);

k - Constante elástica da mola (N/m);

V - Velocidade com que o corpo se desloca no fluido (m/s);

c - Coeficiente de amortecimento;

F_i - Força de inércia (N);

F_a - Força de amortecimento (N);

F_e - Força elástica ou potencial (N);

C_c - Coeficiente de amortecimento crítico;

T_n - Período natural do movimento não amortecido (s);

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

- T_a - Período do movimento amortecido (s);
- F - Força exterior periódica (N);
- W_f - Frequência circular da força exterior periódica (rad/s);
- $x(t)$ - Solução da equação do movimento amortecido forçado;
- $x_{GH}(t)$ - Solução geral da equação homogênea do movimento amortecido livre (movimento transitório);
- x_p - Solução da equação particular do movimento amortecido forçado;
- f - Factor de estabilidade;
- W_e - Frequência de encontro entre o navio e o sistema de ondas (rad/s);
- W_w - Frequência das ondas (rad/s);
- μ - Direcção de avanço das ondas (rad);
- r - Razão entre a frequência de encontro das ondas e a frequência natural de oscilação do navio;
- θ - Ângulo de fase do movimento amortecido livre (rad);
- VCG - Altura do centro de gravidade (m);
- UN – Unidade Naval;
- UAM – Unidade Auxiliar de Marinha;
- ρ - Densidade do ar (Kg/m^3);
- P_i - Pressão total exercida pelo vento em cada faixa longitudinal do navio (Pa);
- A_i - Área vélica de cada faixa longitudinal (m^2);
- L - Braço definido entre os pontos de meio calado ao centróide da área vélica do navio (m);
- V - Velocidade nominal do vento (nós);
- A_1 - Energia estabilizadora (m°);
- A_2 - Energia perturbadora (m°);
- A - Reserva de energia estabilizadora (m°);
- R - Raio de giração do navio (m);
- a_v - Distância vertical entre o centro de gravidade do navio e o centro de resistência lateral, definido a meio calado, com o navio sem adorno (m);
- a_t - Distância transversal da linha de mediania à extremidade da lança do equipamento/sistema de elevação (m);
- d - Altura do ponto de suspensão acima do convés onde a carga ficará estivada (m);
- GM_L - Altura metacêntrica longitudinal (m).

ÍNDICE DE MATÉRIAS

INTRODUÇÃO E O “ESTADO DA ARTE”	-1-
---------------------------------	-----

OBJECTIVOS	-3-
------------	-----

CAPÍTULOS:

1- PRINCÍPIOS BÁSICOS	-6-
-----------------------	-----

- 1.1 - Densidade, volume imerso e impulsão;
- 1.2 - Imersão (*Draught*) e bordo livre (*freebord*);
- 1.3 - Coeficientes de forma.

2- CENTRO DE GRAVIDADE (G) E CENTRO DE IMPULSÃO (B)	-12-
---	------

- 2.1 - Centro de gravidade (G);
- 2.2 - Centro de impulsão (centro do volume de liquido deslocado).

3- INTRODUÇÃO À ESTABILIDADE ESTÁTICA TRANSVERSAL	-18-
---	------

- 3.1 - Braço endireitante (GZ);
- 3.2 - Momento endireitante;
- 3.3 - Metacentro transversal inicial (M);
- 3.4 - Raio metacêntrico (BM);
- 3.5 - Cálculo do momento de estabilidade transversal para pequenos ângulos de adornamento;
- 3.6 - Condições de estabilidade;
 - 3.6.1 - Estabilidade positiva
 - 3.6.2 - Estabilidade neutra
 - 3.6.3 - Estabilidade negativa
- 3.7 - Metacentro transversal inicial.
 - 3.7.1 - Metacêntrico transversal inicial
 - 3.7.2 - Raio metacêntrico (BM)
 - 3.7.3 - Cálculo do KM para navios com formas prismáticas regulares
 - 3.7.4 - Momento de inércia (2º momento) da área de flutuação
 - 3.7.5 - Diagramas metacêntricos
 - 3.7.6 - Factores que influenciam o KM
 - 3.7.6.1 - Boca do navio
 - 3.7.6.2 - Imersão do navio

4- O EFEITO DOS ESPELHOS LIQUIDOS (Superfícies livres) NA ESTABILIDADE TRANSVERSAL	-34-
--	------

5- CURVAS DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL (Curvas GZ)	-38-
---	------

- 5.1 - Cálculo dos valores de GZ;
- 5.2 - Procedimentos para a construção da curva de estabilidade transversal;
- 5.3 - Informação básica obtida a partir da curva de estabilidade transversal.

6- REGRAS DE SIMPSON E ESTABILIDADE DINÂMICA	-42-
6.1- Regras de Simpson para cálculo de áreas delimitadas por curvas;	
6.1.1 - Primeira regra de Simpson	
6.1.1.1 - Extensão da primeira regra	
6.1.2 - Segunda regra de Simpson	
6.1.2.1 - Extensão da Segunda regra	
6.2- Estabilidade dinâmica – a importância da área abaixo da curva de estabilidade.	
6.2.1 - A diferença entre estabilidade dinâmica e estabilidade transversal inicial	
6.2.2 - Relação entre a altura metacêntrica GM e a inclinação inicial da curva de estabilidade transversal	
6.2.3 - Erros associados à prática da utilização da curva de estabilidade transversal para a determinação da estabilidade de navios no mar	
7- CURVAS DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL PARA CONDIÇÕES VARIÁVEIS	-58-
7.1 - Curva de estabilidade transversal para um navio numa condição estável;	
7.2 - Curva de estabilidade transversal para um navio em condição neutra;	
7.3 - Curva de estabilidade transversal para um navio em condição instável (ângulo de adornamento permanente);	
7.4 - Curva de estabilidade transversal inicial quando o centro de gravidade não se encontra sobre a mediania do navio;	
7.5 - Procedimentos para a correção do ângulo de adornamento permanente.	
8- FÓRMULA COMPLETA DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL	-65-
8.1 - Distinção entre estabilidade transversal a pequenos e grandes ângulos de adornamento;	
8.1.1- Estabilidade para pequenos ângulos de adornamento (estabilidade transversal inicial)	
8.1.2- Estabilidade para grandes ângulos de adornamento	
8.2 - Ângulo de adornamento permanente ou ângulo de banda (<i>angle of loll</i>);	
8.3 - Cálculo do ângulo de “ <i>list</i> ” causado por movimento transversal de peso quando o $GM=0$.	
9- FACTORES QUE INFLUENCIAM A FORMA DA CURVA DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL	-73-
9.1 - Efeito da alteração do KG;	
9.2 - Efeito da movimentação transversal de pesos (<i>list</i>);	
9.3 - Efeito da alteração da altura de bordo livre (altura das obras mortas);	
9.3.1 - Efeito da alteração da altura de bordo livre para boca, imersão e KG constantes	

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

9.4 - Comparação da estabilidade de um navio na condição de leve e na condição de carregado;	
9.5 - Efeito da boca do navio;	
9.6 - Efeito do caimento do navio.	
10- PROVA DE ESTABILIDADE	-88-
10.1 - Cálculo de KG na condição de adornado;	
10.2 - Preparativos para a prova de estabilidade (teste de inclinação);	
10.3 - Apresentação de resultados.	
11- ÂNGULO DE ADORNAMENTO NA GUINADA DO NAVIO	-99-
11.1 - Termos relativos ao circulo de giração do navio;	
11.2 - Forças responsáveis pelo adornamento durante a guinada;	
11.3 - Cálculo do ângulo de adornamento durante a guinada;	
11.4 - Cálculo da máxima imersão (aumento de imersão) durante o adornamento.	
12- ADORNAMENTO CAUSADO PELO VENTO, DEPOSIÇÃO DE GELO E BALANÇO CAUSADO PELAS ONDAS	-106-
12.1 - Adornamento devido ao vento;	
12.1.1 - Unidades de pressão do vento, vento severo e “Rolling criterion– (IMO)”.	
12.2 - Deposição de gelo nas superestruturas.	
13- BALANÇO EM ÁGUAS TRANQUILAS	-116-
13.1 - Determinação da altura metacentrica GM através da medição do período de balanço T.	
14- BALANÇO DEVIDO ÀS ONDAS	- 121-
14.1 - Teoria das ondas;	
14.2 - Movimento de balanço devido às ondas;	
14.3 - Métodos para minimizar o movimento de balanço no mar.	
14.3.1 - Sistemas passivos	
14.3.2 - Sistemas activos	
15- MOVIMENTO ANGULAR ACELERADO	-130-
15.1 - Princípios gerais;	
15.2 - Prova de suspensão.	
15.2.1- Determinação do centro de gravidade	
16- MOVIMENTO DE BALANÇO DOS NAVIOS	-134-
16.1 - Equação do movimento;	
16.2 - Determinação do coeficiente de amortecimento;	
16.3 - Balanço transversal em águas tranquilas;	
16.4 - Estabilização do movimento.	
16.4.1 - Introdução	
16.4.2 - Estabilização do balanço	

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

17- O PROJECTO DO MODELO	-145-
17.1 - Construção do modelo;	
17.2 - Construção e colocação dos robaletes;	
17.3 - O lastro;	
17.4 - Sistema de amarração do modelo;	
17.5 - Procedimento experimental e apresentação de resultados;	
17.5.1 - Objectivos	
17.5.2 - Prova de estabilidade e Prova de suspensão	
17.5.3 - Ensaio de extinção de balanço	
18- PROVAS NO NAVIO	-177-
18.1 – Testes de extinção de balanço em águas tranquilas (movimento amortecido livre);	
18.2 – Testes em mar regular (movimento amortecido forçado).	
19 - CONCLUSÕES (e trabalho futuro)	-187-
BIBLIOGRAFIA	-193-

ANEXOS:

ANEXO A: Características do inclinómetro utilizado nas experiências (CXTILTO2E da *Crossbow*).

ANEXO B: Movimento harmónico simples e movimento oscilatório amortecido.

ANEXO C: Critérios de estabilidade das unidades navais de Marinha.

ANEXO D: Cálculos de estabilidade (Corvetas, navios da classe D.Carlos I e N.R.P “Sagres”).

ÍNDICE DE FIGURAS

INTRODUÇÃO E O “ESTADO DA ARTE”

Fig. 1- Os seis graus de Liberdade do sistema navio.	-1-
--	-----

CAPÍTULOS:

1 - PRINCÍPIOS BÁSICOS

Fig. 1.1 – Situações de imersão de um corpo num líquido.	-6-
Fig. 1.2 – Impulsão e peso num corpo flutuante.	-8-
Fig. 1.3 – Volume imerso de um corpo flutuante.	-9-
Fig. 1.4 – Perpendiculares avante e a ré, e linha de flutuação.	-9-
Fig. 1.5 – Área de flutuação.	-10-
Fig. 1.6 – Determinação do coeficiente de bloco.	-11-
Fig. 1.7 – Determinação do coeficiente da área a meio navio.	-11-
Fig. 1.8 – Determinação do coeficiente prismático longitudinal.	-12-

2 - CENTRO DE GRAVIDADE (G) E CENTRO DE IMPULSÃO (B)

Fig. 2.1 – Posição relativa entre o centro de aplicação do peso e o da impulsão.	-13-
Fig. 2.2 – A posição do ponto G durante os adornamentos do navio.	-13-
Fig. 2.3 – Posição vertical dos centros de massa do navio e de pesos a bordo.	-14-
Fig. 2.4 – Alteração da posição vertical do ponto G com a deslocação de pesos a bordo.	-14-
Fig. 2.5 – Adição de peso a bordo.	-15-
Fig. 2.6 – Componentes do movimento do ponto G.	-15-
Fig. 2.7 – Adição de peso: esquema de cálculo da componente vertical.	-16-
Fig. 2.8 – Remoção de peso: esquema de cálculo da componente vertical.	-16-
Fig. 2.9 – Localização do centro de impulsão (B) de um objecto prismático flutuante.	-18-

3- INTRODUÇÃO À ESTABILIDADE ESTÁTICA TRANSVERSAL

Fig. 3.1 - O navio retorna á sua posição inicial, devido á acção das forças que actuam em G e em B, quando a força externa é removida.	-19-
Fig. 3.2 – Braço endireitante (GZ).	-19-
Fig. 3.3 – Alteração do braço endireitante com o adorno do navio.	-20-
Fig. 3.4 – Curva de estabilidade transversal ou curva GZ.	-21-
Fig. 3.5 – Metacentro transversal inicial (M).	-22-
Fig. 3.6 – Altura metacêntrica transversal (GM).	-22-
Fig. 3.7 – Triângulo GZM.	-23-
Fig. 3.8 – Altura Metacêntrica positiva.	-24-
Fig. 3.9 – Altura Metacêntrica nula.	-25-
Fig. 3.10 – Estabilidade transversal nula.	-25-
Fig. 3.11 – Estabilidade transversal nula.	-26-
Fig. 3.12 – Estabilidade transversal negativa.	-27-
Fig. 3.13 – Metacentro transversal inicial.	-28-
Fig. 3.14 – Raio metacêntrico (BM).	-29-

Fig. 3.15 – Representação de uma área prismática de flutuação.	-30-
Fig. 3.16 – Variação de KM com a imersão.	-31-
Fig. 3.17 – Gráfico de KM em função de d (KG fixo).	-32-
Fig. 3.18 – Variação da altura do metacentro (KM) com a Boca do navio.	-33-
Fig. 3.19 – Variação da altura do metacentro (KM) com a imersão do navio.	-34-

4- O EFEITO DOS ESPELHOS LIQUIDOS (Superfícies livres) NA ESTABILIDADE TRANSVERSAL

Fig. 4.1 – Adornamento com liquido congelado no interior.	-34-
Fig. 4.2 – Liquido congelado no interior: posição de navio direito.	-35-
Fig. 4.3 – Liquido congelado no interior: posição de navio adornado.	-35-
Fig. 4.4 – Formas de divisão interior dos tanques.	-37-

5- CURVAS DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL (CURVAS GZ)

Fig. 5.1 – Curva de estabilidade transversal (curva GZ).	-38-
Fig. 5.2 – Representação do KN.	-39-
Fig. 5.3 – Exemplo de uma curva de estabilidade para um GM inicial de 0,54m.	-40-
Fig. 5.4 – Alteração do sentido de curvatura da curva de estabilidade transversal, correspondente à borda livre nula.	-41-
Fig. 5.5 – Algumas informações fornecidas pela curva de estabilidade.	-42-

6- REGRAS DE SIMPSON E ESTABILIDADE DINÂMICA

Fig. 6.1 – Figura para aplicação da primeira regra de Simpson.	-43-
Fig. 6.2 – Figura para aplicação da extensão da primeira regra de Simpson.	-44-
Fig. 6.3 – Figura para aplicação da segunda regra de Simpson.	-45-
Fig. 6.4 – Figura para aplicação da extensão da segunda regra de Simpson.	-46-
Fig. 6.5 – Estabilidade Dinâmica.	-47-
Fig. 6.6 – Peso, Impulsão e braço endireitante.	-48-
Fig. 6.7 – Exemplo de estabilidade dinâmica para diferentes ângulos de adornamento.	-49-
Fig. 6.8 – Curvas de estabilidade estática e dinâmica.	-50-
Fig. 6.9 – Altura metacêntrica (GM) inicial e inclinação inicial da curva de estabilidade transversal.	-51-
Fig. 6.10 – Alteração da estabilidade quando o navio se encontra na crista da onda.	-54-
Fig. 6.11 – Efeito do movimento de água no convés na estabilidade transversal.	-56-
Fig. 6.12 – Movimento de guinada devido à ondulação.	-56-
Fig. 6.13 – Comparação de braços endireitantes em águas tranquilas e com ondulação.	-57-

7- CURVAS DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL PARA CONDIÇÕES VARIÁVEIS

Fig. 7.1 – Curva de estabilidade positiva.	-58-
Fig. 7.2 – Adornamento de um navio com estabilidade neutra.	-59-
Fig. 7.3 – Curva de estabilidade neutra.	-60-
Fig. 7.4 – Adornamento de um navio em condição instável.	-61-
Fig. 7.5 – Curva de estabilidade em condição instável.	-62-

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

Fig. 7.6 – Adornamento de um navio quando o centro de gravidade não se encontra sobre a mediania do navio. -63-

Fig. 7.7 – Curva de estabilidade quando o centro de gravidade não se encontra sobre a mediania do navio. -64-

8 - FÓRMULA COMPLETA DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL

Fig. 8.1 – Alteração do centro de aplicação da impulsão (B) com o adornamento (pequeno ângulo). -65-

Fig. 8.2 – Raio Metacêntrico (BM). -66-

Fig. 8.3 – Alteração do centro de aplicação da impulsão (B) com o adornamento (grande ângulo). -67-

Fig. 8.4 – Navio adornado com altura metacêntrica negativa, e até ao ângulo de adornamento permanente. -68-

Fig. 8.5 – Navio adornado com altura metacêntrica negativa, para além do ângulo de adornamento permanente. -70-

Fig. 8.6 – Navio adornado com altura metacêntrica nula, através de embarque de pesos. -71-

Fig. 8.7 – Análise do triângulo GZM com o navio adornado com altura metacêntrica nula, e com deslocamento transversal de pesos . -72-

9- FACTORES QUE INFLUENCIAM A FORMA DA CURVA DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL

Fig. 9.1 – Efeito da alteração de KG. -74-

Fig. 9.2 – Efeitos na curva de estabilidade devido a alteração de KG. -76-

Fig. 9.3 – Navio adornado por uma força exterior com o ponto G sobre a linha de mediania. -78-

Fig. 9.4 – Peso movimentado ao longo do convés depois do navio ser adornado por uma força exterior com o ponto G, inicialmente, sobre a linha de mediania. -78-

Fig. 9.5 – Alterações na curva de estabilidade devido ao movimento transversal de pesos. -79-

Fig. 9.6 – Navios com a mesma boca e diferentes bordos livres. -81-

Fig. 9.7 – Curvas de estabilidade para navios com diferentes bordos livres. -81-

Fig. 9.8 – Exemplo de um diagrama metacêntrico de um navio. -82-

Fig. 9.9 – Navio na condição de leve e na condição de carregado. -83-

Fig. 9.10 – Curvas de estabilidade de um navio na condição de leve e na condição de carregado. -84-

Fig. 9.11 – Navios com bocas diferentes, com a mesma imersão e mesma altura do centro de gravidade KG. -85-

Fig. 9.12 – Efeito da boca na estabilidade transversal inicial. -86-

Fig. 9.13 – Aumento do KM transversal causado pelo aumento de caimento a ré. -87-

Fig. 9.14 – Alteração da curva de estabilidade causada pelo aumento de caimento a ré. -88-

10- PROVA DE ESTABILIDADE

Fig. 10.1 – Experiência de inclinação. -90-

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

Fig. 10.2 – Deslocamento de um peso móvel durante a prova de estabilidade.	-92-
Fig. 10.3 – Esquema de obtenção dos ângulos de adornamento.	-93-
Fig. 10.4 – Colocação do pêndulo.	-96-
Fig. 10.5 – Recta de regressão.	-97-
 11- ÂNGULO DE ADORNAMENTO NA GUINADA DO NAVIO	
Fig. 11.1 – Rumo traçado por um navio durante a guinada.	-100-
Fig. 11.2 – Forças actuantes na porta do leme durante a guinada.	-101-
Fig. 11.3 – Binário de forças no adornamento inicial durante a guinada do navio (navio a guinar para estibordo).	-102-
Fig. 11.4 – Força centrífuga e centrípeta durante a guinada do navio (navio a guinar para estibordo).	-103-
Fig. 11.5 – Binário de forças no adornamento durante a guinada constante (navio a guinar para estibordo).	-104-
Fig. 11.6 – Imersão quando o navio adorna.	-105-
 12- ADORNAMENTO CAUSADO PELO VENTO, DEPOSIÇÃO DE GELO E BALANÇO CAUSADO PELAS ONDAS	
Fig. 12.1 – Curva dos momentos endireitantes para bombordo e para estibordo.	-107-
Fig. 12.2 – Centro geométrico da área lateral exposta do navio (C).	
Fig. 12.3 – Binário de forças devido ao vento.	-108-
Fig. 12.4 – Diagrama dos momentos endireitantes e dos momentos inclinantes de vento estável e de vento de rajada.	-109-
Fig. 12.5 – Esquema para o cálculo do ângulo de adornamento dinâmico.	-110-
Fig. 12.6 – Máxima e média carga de gelo recomendada por unidade de área, nas superestruturas.	-114-
Fig. 12.7 – Efeitos da deposição de gelo na curva de estabilidade transversal.	-115-
 13- BALANÇO EM ÁGUAS TRANQUILAS	
Fig. 13.1 – Movimento de balanço transversal.	-116-
Fig. 13.2 – Oscilação ideal e não amortecida.	-117-
Fig. 13.3 – Forma de aumentar o raio de giração K do navio.	-118-
Fig. 13.4 - Uma vara comprida permite melhor equilíbrio.	-119-
 14- BALANÇO DEVIDO ÀS ONDAS	
Fig. 14.1 – Forma trocoidal das ondas.	-121-
Fig. 14.2 – Movimento orbital das partículas de água.	-122-
Fig. 14.3 – Comportamento do navio com grande boca.	-123-
Fig. 14.4 – Comportamento do navio com pequena boca.	-124-
Fig. 14.5 – Tanques estabilizadores passivos.	-126-
Fig. 14.6 – Forma dos tanques estabilizadores.	-127-
Fig. 14.7 – Tanques estabilizadores activos.	-128-
Fig. 14.8 – Estabilizadores hidrodinâmicos com movimento angular.	-129-

15- MOVIMENTO ANGULAR ACELERADO

Fig. 15.1 – Componentes da aceleração de uma partícula animada de Movimento de Rotação Acelerado.	-130-
Fig. 15.2 – Determinação do Centro de Gravidade através da Prova de Suspensão.	-133-

16- MOVIMENTO DE BALANÇO DOS NAVIOS

Fig. 16.1 – Curva sinusoidal amortecida.	-136-
Fig. 16.2 – Robaletes fixos ao casco.	-139-
Fig. 16.3 – Acção dos robaletes fixos ao casco.	-140-
Fig. 16.4 – Influência dos robaletes na redução do balanço.	-140-
Fig. 16.5 – Variação do coeficiente de amortecimento do balanço com a razão entre a velocidade e o comprimento do navio.	-141-
Fig. 16.6 – Representação dos seis graus de liberdade do navio.	-143-
Fig. 16.7 – Determinação do coeficiente de amortecimento através de ensaios de extinção de balanço.	-145-

17- O PROJECTO DO MODELO

Fig. 17.1 – Robaletes de corveta da classe “Batista de Andrade”.	-146-
Fig. 17.2 – Representação gráfica da secção de maior boca das corvetas.	-147-
Fig. 17.3 – Representação do Modelo em ambiente <i>Solid Works</i> .	-149-
Fig. 17.4 – Distribuição do lastro pelo modelo.	-150-
Fig. 17.5 – Partes constituintes do modelo.	-151-
Fig. 17.6 – Evolução da construção do Modelo.	-152-
Fig. 17.7 – Modelo equilibrado.	-152-
Fig. 17.8 – Robalete do Modelo.	-153-
Fig. 17.9 – Furações no casco para fixação dos robaletes.	-153-
Fig. 17.10 – Parafusos de fixação dos robaletes.	-154-
Fig. 17.11 – Proporção dos robaletes com o modelo.	-154-
Fig. 17.12 – Lastro do Modelo.	-155-
Fig. 17.13 – Representação em <i>Solid Works</i> do Lastro do Modelo.	-155-
Fig. 17.14 – Vista frontal do Sistema de Amarração.	-156-
Fig. 17.15 – Vista lateral do Sistema de Amarração.	-157-
Fig. 17.16 – Tanque de Experiências do Laboratório de Arquitectura Naval.	-158-
Fig. 17.17 – Deslocamento do lastro durante uma Prova de Estabilidade (com o pêndulo).	-160-
Fig. 17.18 – Suportes em madeira de sustentação do modelo.	-161-
Fig. 17.19 – Suportes colocados no modelo.	-161-
Fig. 17.20 – Modelo Suspenso.	-161-
Fig. 17.21 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e sem pesos.	-165-
Fig. 17.22 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e com 8 pesos no fundo.	-166-
Fig. 17.23 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e com 8 pesos em cima.	-167-
Fig. 17.24 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e com 4 pesos em cima.	-168-

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

Fig. 17.25 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e sem pesos.	-169-
Fig. 17.26 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 8 pesos no fundo.	-170-
Fig. 17.27 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 8 pesos em cima.	-171-
Fig. 17.28 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 4 pesos em cima.	-172-
Fig. 17.29 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 4 pesos em cima e com 4 pesos no fundo.	-173-
Fig. 17.30 – Movimento oscilatório do modelo com espelhos líquidos.	-175-
 18- PROVAS NO NAVIO	
Fig. 18.1 – Características gerais das corvetas.	-177-
Fig. 18.2 – Sequência de acções para o teste de extinção de balanço no navio.	-178-
Fig. 18.3 – O navio com movimento amortecido livre (extinção de balanço).	-179-
Fig. 18.4 – Movimento amortecido livre do NRP “João Roby”.	-180-
Fig. 18.5 – Características médias padrão de ondulação do Atlântico Norte.	-182-
Fig. 18.6 – O navio com movimento amortecido forçado.	-182-
Fig. 18.7 – Movimento amortecido forçado do NRP “João Roby”.	-183-
Fig. 18.8 – Frequência de encontro entre o navio e o sistema de ondas.	-183-
Fig. 18.9 – Movimentos amortecidos forçados com ondas regulares do NRP “João Roby”.	-185-
Fig. 18.10 – Curvas de ressonância do movimento amortecido forçado.	-186-
Fig. 18.11 – Curvas de estabilidade das Corvetas para as condições de carregado e de mínimo operativo.	-187-
 ANEXO A – Características do inclinómetro utilizado nas experiências (CXTILTO2E da <i>Crossbow</i>)	
Fig. A.1 – Características do inclinómetro utilizado nas experiências.	-195-
 ANEXO B – Movimento Harmónico Simples e Movimento oscilatório amortecido	
Fig. B.1– Movimento Harmónico Simples (MHS) e Movimento Circular Uniforme (MCU).	-197-
Fig. B.2 – Movimento circular uniforme.	-198-
Fig. B.3 – Movimento pendular.	-201-
Fig. B.4 – Sistema corpo-mola.	-205-
Fig. B.5 – Experiência de demonstração da ressonância.	-207-
Fig. B.6 – Sistema elástico livre e amortecido.	-210-
Fig. B.7 – Movimento superamortecido.	-214-
Fig. B.8 – Movimento subamortecido.	-215-
Fig. B.9 – Curva sinusoidal amortecida típica de um teste de extinção de balanço de um navio.	-217-
Fig. B.10 – Sistema mecânico elástico, forçado e amortecido.	-219-
Fig. B.11 – Movimento amortecido forçado.	-220-
Fig. B.12 – Factor de amplificação em função da razão de frequências r.	-221-

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação de Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real”

Fig. B.13 – Exemplo de teste de extinção de balanço a bordo do NRP “João Roby”.	-224-
Fig. B.14 – Exemplo de teste com ondas regulares a bordo do NRP “João Roby”.	-225-
ANEXO C – Critérios de estabilidade das unidades navais da Marinha	
Fig. C.1 – Curva de braço endireitante intacta.	-232-
Fig. C.2 – Variação da velocidade do vento com a elevação.	-235-
Fig. C.3 – Braço definido entre os pontos de meio calado ao centróide da área vélica do navio (L).	-236-
Fig. C.4 – Curvas de braço endireitante (GZ) e braço inclinante devido ao vento pelo través.	-236-
Fig. C.5 – Curvas de braço endireitante (GZ) e braço inclinante devido a guinada a velocidade elevada.	-238-
Fig. C.6 – Curvas de braço endireitante (GZ) e braço inclinante devido à elevação e transbordo de cargas pesadas.	-240-
Fig. C.7 – Velocidade nominal do vento para estabilidade em avaria de navios com deslocamento até 5000 toneladas.	-244-
Fig. C.8 – Área estabilizadora (A1) requerida para estabilidade em avaria.	-245-
Fig. C.9 – Curva de braço endireitante e inclinante devido a avaria e vento pelo través.	-245-
ANEXO D – Cálculos de estabilidade (Corvetas, navios da classe D. Carlos I e N.R.P. “Sagres”).	

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro nº 1 – Mapa-geral do trabalho.	-5-
Quadro nº 10.1 – Fluxograma de Processo da Prova de Estabilidade.	-99-
Quadro nº 17.1 – Dimensões de Projecto do Modelo.	-148-
Quadro nº 17.2 – Características de Projecto do Modelo.	-150-
Quadro nº 17.3 – Leituras de deflexão no modelo.	-161-
Quadro nº 17.4 – Síntese das experiências de extinção de balanço no modelo, para diversas condições de carga.	-176-
Quadro nº 18.1 – Altura metacêntrica (GM), período (T) e factor de estabilidade (f) em função do deslocamento, nas Corvetas.	-180-
Quadro nº B.1 – Seno de um ângulo pequeno (em radianos).	-204-
Quadro nº C.1 – Definição das cargas líquidas na condição de deslocamento mínimo operativo.	-229-
Quadro nº C.2 – Definição das cargas sólidas na condição de deslocamento mínimo operativo.	-230-
Quadro nº C.3 – Definição das cargas líquidas na condição de deslocamento carregado.	-231-
Quadro nº C.4 – Definição das cargas sólidas na condição de deslocamento carregado.	-231-
Quadro nº C.5 – Critérios para a curva de braço endireitante.	-233-
Quadro nº C.6 – Definição das condições: velocidades nominais do vento.	-234-

INTRODUÇÃO E O “ESTADO DA ARTE”

O presente trabalho encontra contexto na área da Dinâmica do Navio, dando corpo a um estudo congregador e objectivo no âmbito do Balanço Transversal de Navios. Com o Navio como objecto de estudo, o trabalho pretende relevar os aspectos mais importantes que devem constituir um estudo sobre o movimento de balanço transversal, num patamar teórico e num outro, não menos importante, experimental.

Numa primeira análise, a previsão do comportamento do navio é um passo importante no procedimento de projecto, seja este comportamento entendido no domínio da Estabilidade Inicial ou no domínio de excitação em ondas, regulares, ou irregulares. Porém, numa análise mais alargada, importa estabelecer relações e conhecer a tradução matemática de certos fenómenos, quer por métodos determinísticos quer por métodos estatísticos, como é o caso do comportamento em mar irregular.

A análise independente dos movimentos é, naturalmente, um exercício meramente teórico e académico, contudo, a compreensão das partes é o “caminho certo” para a compreensão do todo e é nessa acepção que se encontra a motivação fundamental para o estudo de um movimento específico, desacoplado de todos os outros.

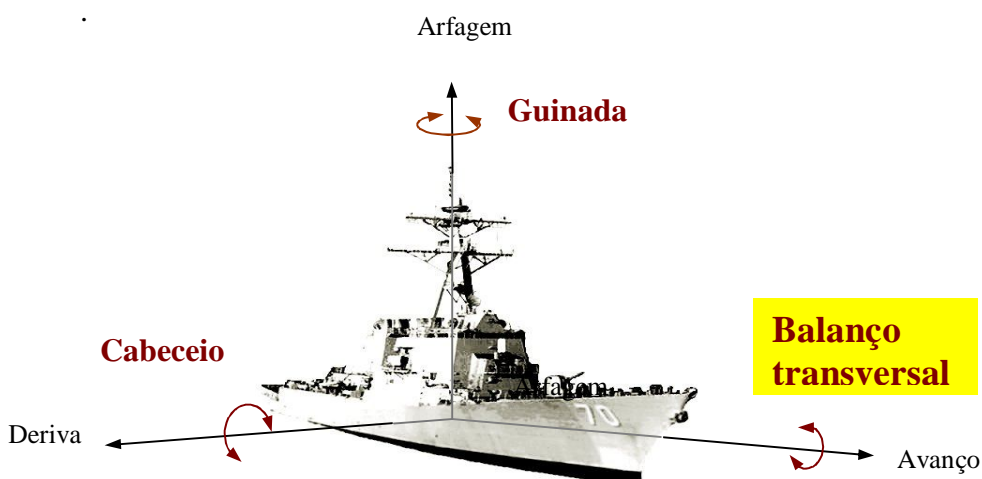


Fig. 1- Os seis graus de Liberdade do sistema navio.
(a vermelho: os três movimentos oscilatórios)

Para a parte experimental foi utilizado um inclinómetro para aquisição dos valores de adorno, e o sinal recolhido foi tratado em computador através de interface adequado, onde posteriormente foi trabalhado, de modo a apresentar os

resultados da altura metacêntrica, gráficos de oscilação do navio e as equações do movimento de balanço transversal.

O mais importante movimento do navio, em termos da sua segurança, é efectivamente o Balanço Transversal, uma vez que em comparação com o cabeceio, ou mesmo a guinada, este envolve momentos de restituição, ou endireitantes, muito menores e muito mais sensíveis a pequenas mudanças na condição de estabilidade inicial. No estudo do movimento de balanço é usual considerar-se suficiente, para determinar as características do balanço, a equação linear do movimento. Para ângulos maiores, no entanto, tornam-se significativos muitas não-linearidades, que fazem a aproximação linear carecer de ajustes significativos. Um dos fenómenos que na realidade encontra, fisicamente, uma expressiva diferença em relação ao seu modelo teórico é o da Ressonância. Quer se considerem ou não, as não-linearidades estão presentes, e aparecerão num estudo experimental, fazendo certos resultados divergir daqueles esperados pela interpretação “purista” das equações lineares.

Depois de consultada diversa bibliografia e a Internet, assim como após consulta a diversos Técnicos e Engenheiros com conhecimentos nesta matéria, foi constatado o seguinte:

- Os navios, em geral, possuem quadros com a indicação de áreas de compartimentos, em que um alagamento é nefasto para a estabilidade do navio (não quantificam o grau de avaria, nem entram em linha de conta com a variação dos efeitos exteriores: vento e ondulação);
- Os navios de carga possuem tabelas pré-estabelecidas para determinados esquemas de estiva a bordo; mas caso seja usado um esquema diferente, as referidas tabelas não servem;
- Em caso de dúvidas sobre a estabilidade, os Comandantes dos navios, normalmente contactam os serviços técnicos em terra, que terão de fazer imensos cálculos, com a consequente perda de tempo, além de que os cálculos são incompletos no que concerne à medição e integração, em tempo real, do comportamento instantâneo do navio com as condições climatéricas;
- O signatário não tem conhecimento de que exista em Portugal (e na Europa) um sistema para a avaliação da estabilidade de navios, em tempo real.

OBJECTIVOS

Pretende o presente estudo abordar o balanço não considerando as não-linearidades, sabendo contudo que elas existem. Assim, e como será abordado mais à frente, a construção de um modelo, a utilizar no procedimento experimental, é efectuada no sentido de fazer as parcelas não-lineares da equação de balanço tender para zero. A forma prática de conseguir isto passa por planear uma superfície de obras vivas do modelo o mais suave possível, sem quinas e num material pouco rugoso, apostando assim numa clara minimização de fenómenos dissipativos, em atrito e por meio de vórtices gerados em irregularidades superficiais. A compreensão do comportamento não-linear no balanço de navios é limitada, contudo importa considerar, mesmo que numa fase introdutória, a limitação própria de um tratamento linear do movimento em causa.

De uma forma estruturada, e seguindo os passos de uma aproximação experimental, o estudo evolui no sentido da construção de uma equação dita Equação de Movimento para o Balanço Transversal de Navios. Esta equação é uma equação diferencial que se obtém a partir dos momentos distintos que actuam no navio tais como os momentos inerciais devidos à massa real e virtual (ou acrescentada) do navio, o momento de amortecimento, o momento de restituição endireitante e os momentos de excitação que são provocados pelas ondas, vento, variações na distribuição de pesos, etc...

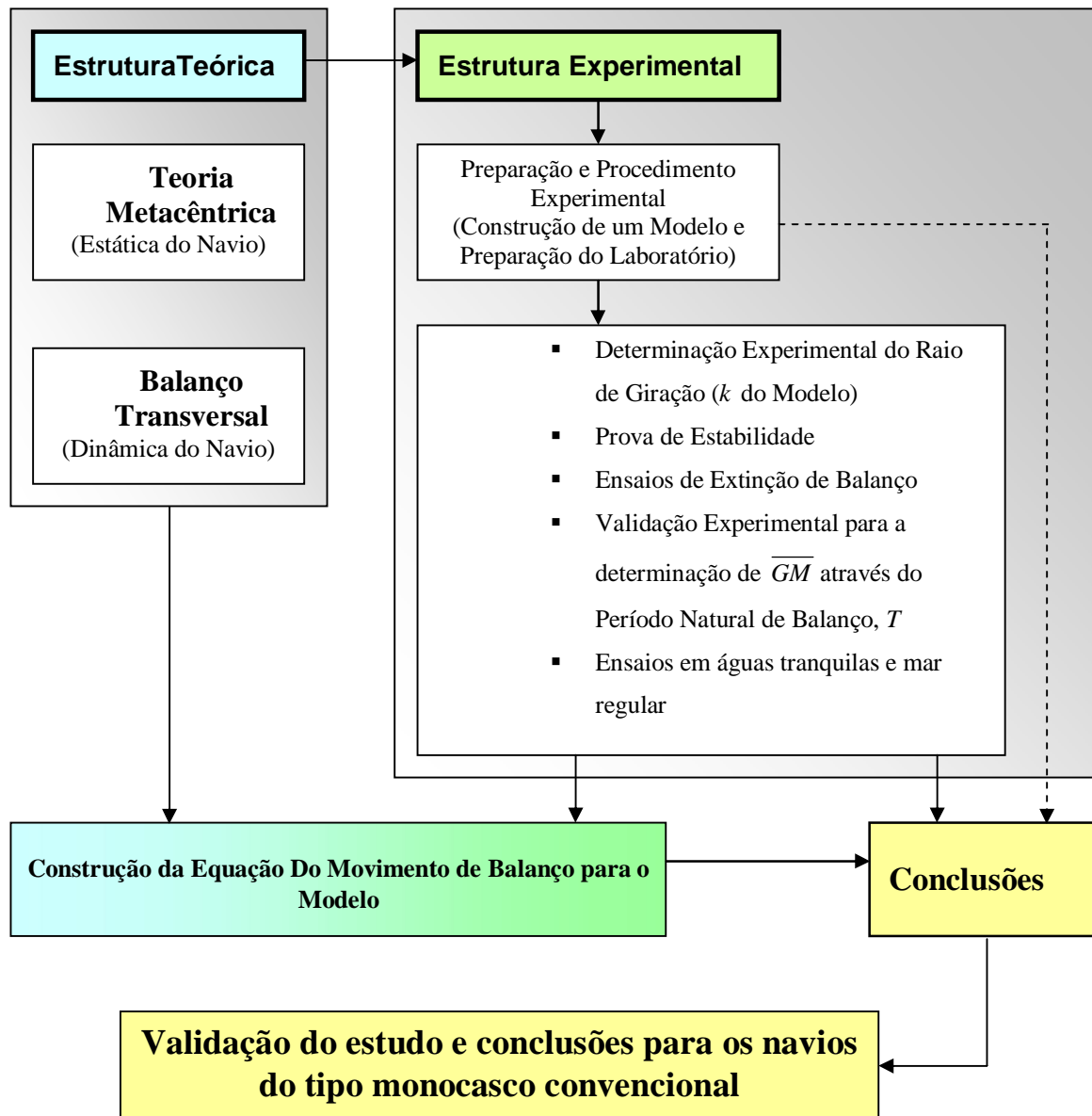
A determinação do amortecimento do navio é uma das etapas mais importantes para a determinação do movimento de balanço em ondas. No entanto não existe nenhuma teoria “sólida” para a previsão do amortecimento para um dado navio, o que leva ao recurso a métodos empíricos como é o caso da aplicação do decremento logarítmico, calculado a partir de testes de extinção de balanço (movimento amortecido livre).

Ainda dentro do contexto do trabalho, e numa fase experimental pretende o presente estudo abordar os fundamentos teóricos, validando experimentalmente o método de obtenção da Altura Metacêntrica Transversal através da leitura do Período Natural para o movimento de balanço, pretendendo desta forma servir como alicerce teórico-experimental para a validação do *Sistema de Avaliação da Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real*.

Resumindo e estruturando os objectivos para o presente trabalho:

- Estudar o Movimento de Balanço Transversal de Navios, de uma forma independente dos outros movimentos, apresentando uma linha que aborda a Teoria Metacêntrica e a Dinâmica do Navio.
- Desenvolver, analiticamente, seguindo autores que efectuaram estudos na área, nomeadamente *Bhattacharyya*, *Mathisen* e *Price*, de métodos para a determinação experimental dos coeficientes da equação de movimento para o Balanço Transversal.
- Desenvolver e implementar um procedimento experimental para o estudo dos fenómenos associados ao movimento de balanço em águas tranquilas e em ondas regulares.
- Construir um modelo de uma secção transversal de um navio de casco regular tendo por objectivo o desenvolvimento do estudo experimental, utilizando para o efeito o Laboratório de Arquitectura Naval da Escola Naval.
- Construir a Equação do Movimento para o movimento de balanço, para o modelo em causa, utilizando para o efeito os coeficientes determinados experimentalmente.
- Validar experimentalmente, através do modelo, o método de obtenção da Altura Metacêntrica Transversal, *GM*, através da leitura do Período Natural de Balanço *T*, apresentando uma rotina lógica para a informação permanente da condição de Estabilidade do navio.

De forma a dar corpo ao estudo proposto, o trabalho encontra o seu “mapa-geral” estruturado da seguinte forma:



Quadro nº1 – Mapa-geral do trabalho.

1 - PRINCÍPIOS BÁSICOS

1.1 - Densidade, volume imerso e impulsão

Princípio de Arquimedes:

Todo o corpo mergulhado num fluido sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

Arquimedes descobriu que um corpo imerso na água se torna mais leve devido a uma força, exercida pelo líquido sobre o corpo, vertical e para cima, que alivia o peso do corpo.

Essa força, do líquido sobre o corpo, é denominada **Impulsão (I)**. Portanto, sobre um corpo que se encontra imerso num líquido, actuam duas forças: a força Peso (P), devido à interacção com a força gravitacional terrestre, e a força de **Impulsão (I)**, devido à interacção do líquido com o corpo.

Quando um corpo está totalmente imerso num líquido, podemos ter as seguintes condições:

- Se este permanecer parado no ponto onde foi colocado, a intensidade da força de impulsão é igual à intensidade da força Peso (**$I = P$**);
- Se o corpo se afundar, a intensidade da força de impulsão é menor do que a intensidade da força Peso (**$I < P$**);
- Se por sua vez for levado para a superfície, a intensidade da força de impulsão é maior do que a intensidade da força Peso (**$I > P$**)

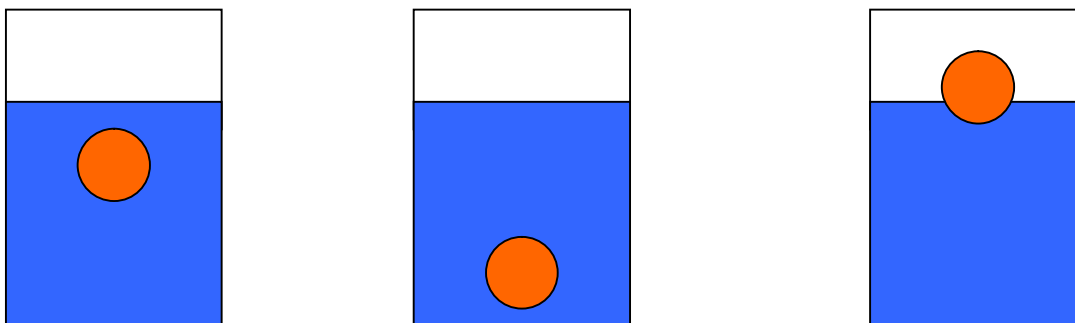


Fig. 1.1 – Situações de imersão de um corpo num líquido.

O Princípio de Arquimedes permite saber qual das três situações irá ocorrer.

$$\mathbf{I = P_{fd}}$$

em que: P_{fd} = Peso do fluido deslocado

$$P_{fd} = \rho_f \cdot V_{fd} \cdot g = m_{fd} \cdot g$$

$$I = m_{fd} \cdot g$$

Seja V_{fd} o volume de fluido deslocado pelo corpo. Então a massa do fluido deslocado é dada por:

$$m_{fd} = \rho_f \cdot V_{fd}$$

A intensidade da impulsão é igual à do peso dessa massa deslocada:

$$\mathbf{I = m_{fd} \cdot g = \rho_{fd} \cdot V_{fd} \cdot g}$$

Para corpos totalmente imersos, o volume de fluido deslocado é igual ao próprio volume do corpo. Neste caso, a intensidade do peso do corpo e da impulsão são dadas por:

$$P = \rho_c \cdot V_c \cdot g \quad \text{e} \quad I = \rho_f \cdot V_{fd} \cdot g$$
$$V_c = V_{fd}$$

A densidade ou massa volúmica de uma substância traduz-se na sua massa por unidade de volume e é expressa por:

$$\text{Densidade} = \frac{\text{Massa}}{\text{Volume}}$$

Para estudos de estabilidade de navios a massa é expressa em toneladas, o volume em m^3 e a densidade em tons/m^3 . A fórmula anterior pode ser rearranjada nas seguintes formas:

$$\text{Volume} = \frac{\text{Massa}}{\text{Densidade}}$$

$$\text{Massa} = \text{Volume} \times \text{Densidade}$$

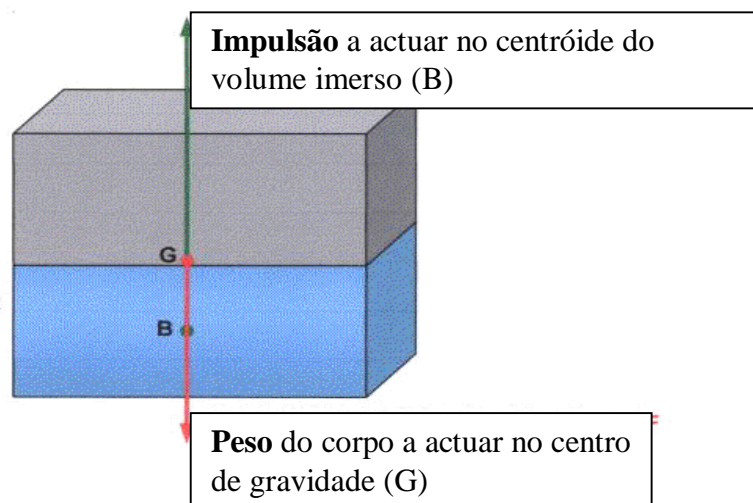


Fig. 1.2 – Impulsão e peso num corpo flutuante.

A densidade média da água doce é de $1,0 \text{ t/m}^3$ e a da água do mar de $1,025 \text{ t/m}^3$.

O ponto G representa o centro de massa do objecto e o centro de aplicação do peso, enquanto que o ponto B representa o centro do volume de liquido deslocado e o centro de aplicação da impulsão.

O deslocamento (massa) de um navio (ou qualquer outro objecto flutuante) é assim definido pelo número de toneladas de água deslocada. O volume de deslocamento representa o volume imerso do navio, ou seja, o volume abaixo da linha de flutuação do navio a flutuar:

$$\text{Deslocamento (W)} = \text{Volume Imerso de Deslocamento (V)} \times \text{Densidade da água (p)}$$

$$W = V \times p$$

Por exemplo para um objecto com a forma de prisma rectangular regular temos que:

$$\text{MASSA} = \text{VOLUME} \times \text{DENSIDADE}$$

i.e.

$$\text{DESLOCAMENTO} = \text{VOLUME IMERSO DE DESLOCAMENTO} \times \text{DENSIDADE DA ÁGUA}$$

onde:

$$\text{VOLUME IMERSO DE DESLOCAMENTO} = \text{COMPRIMENTO} \times \text{BOCA} \times \text{IMERSÃO}$$
$$(V = L \times B \times d)$$

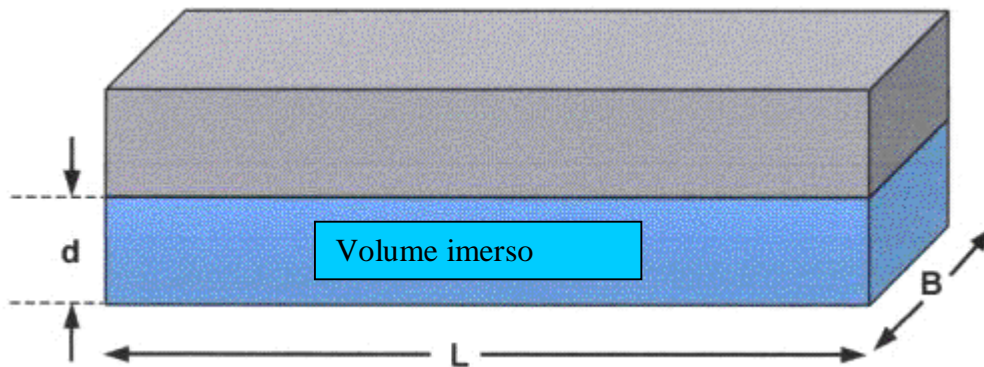


Fig. 1.3 – Volume imerso de um corpo flutuante.

1.2 - Imersão (*Draught*) e bordo livre (*Freebord*)

A imersão de um navio corresponde à distância medida a partir da quilha até à linha de flutuação (*water line*: WL), e corresponde à média das imersões medidas na perpendicular avante e a ré do navio (*Forward and Aft perpendiculars*: FP, AP), e é expressa em metros.

O bordo livre é a distância, em metros, medida entre a linha de flutuação (WL) e a parte superior e contínua do convés, e é medida a meio-navio.

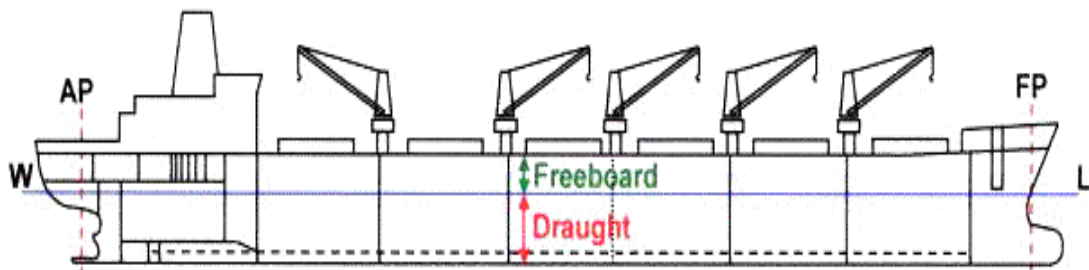


Fig. 1.4 – Perpendiculares avante e a ré, e linha de flutuação.

[Rhodes, Martin (2003)]

1.3 - Coeficientes de forma

Os coeficientes de forma são quocientes que comparam numericamente a forma imersa dos navios com formas regulares que possuem as maiores dimensões do navio. Estes coeficientes são utilizados ainda durante a fase de projecto e de construção do navio de modo a prever factores tais como a resistência dinâmica, e para estimar as necessidades em termos de aparelho propulsor para determinadas velocidades de operação. Todos estes coeficientes são adimensionais e menores do que 1.00.

Coeficiente de finura da área de flutuação (*Water Plane Area: WPA*) – C_w :

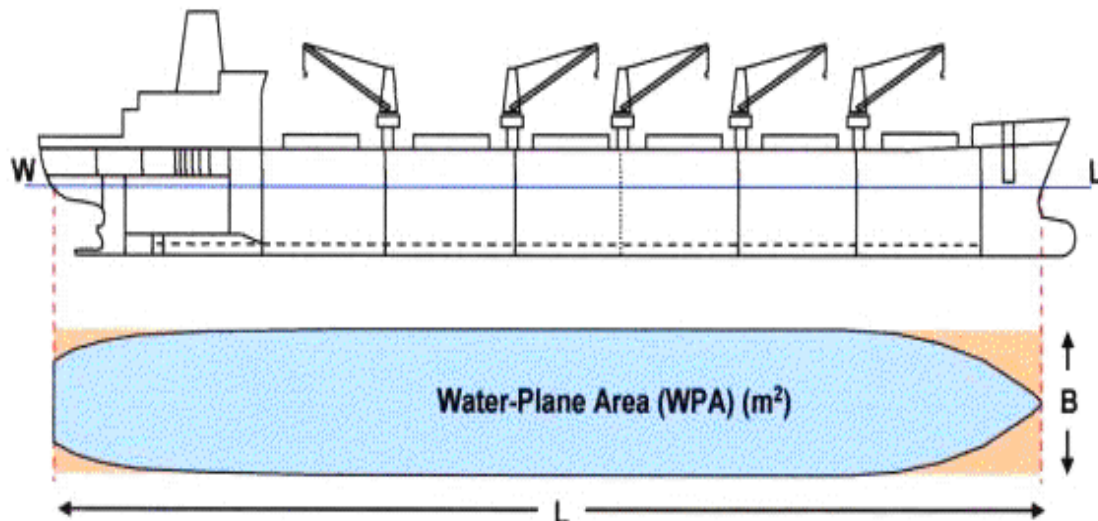


Fig. 1.5 – Área de flutuação.

[Rhodes, Martin (2003)]

$$C_w = \frac{WPA}{L \times B}$$

Coeficiente de bloco – CB:

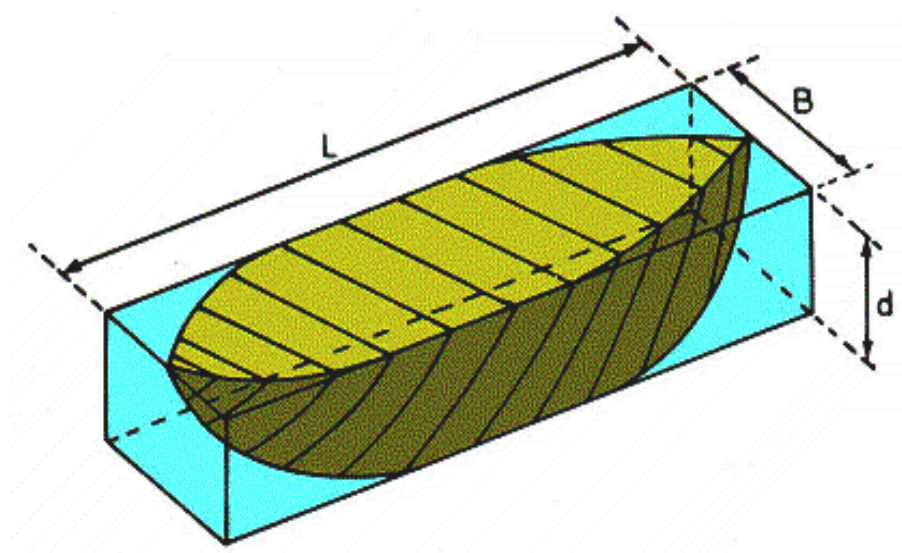


Fig. 1.6 – Determinação do coeficiente de bloco.
[Rhodes, Martin (2003)]

$$\text{Deslocamento do navio} = (L \times B \times d \times C_B) \times \rho$$

$$C_B = \frac{\text{Volume.Imerso.de.Deslocamento}}{L \times B \times d}$$

Coeficiente da área a meio navio – CM:

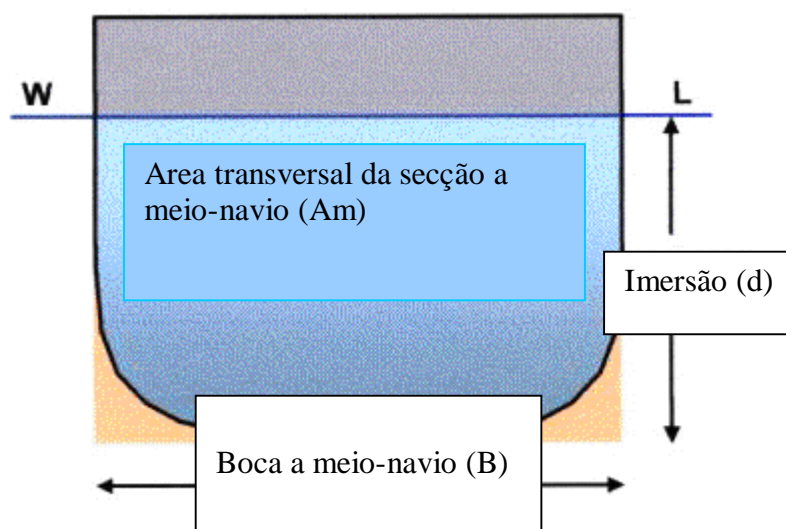


Fig. 1.7 – Determinação do coeficiente da área a meio navio.

$$CM = \frac{Am}{B \times d}$$

$$CM = \frac{Area.transversal.da.secção.a.meio - navio(Am)}{B \times d}$$

Coeficiente prismático longitudinal - Cp:

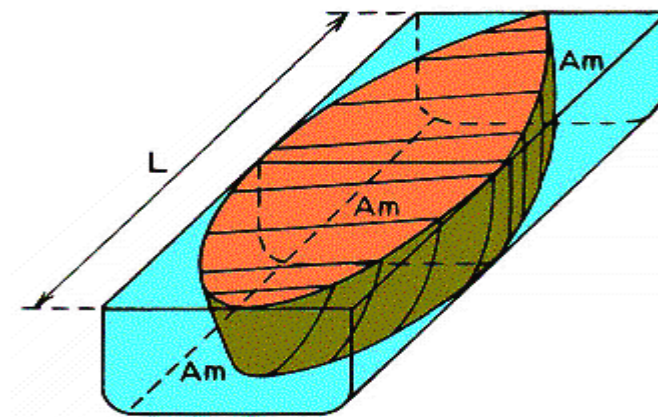


Fig. 1.8 – Determinação do coeficiente prismático longitudinal.
[Rhodes, Martin (2003)]

$$Cp = \frac{\text{Volume.de.deslocamento.do.navio}}{\text{Volume.do.prisma}}$$

$$Cp = \frac{\text{Volume.de.deslocamento.do.navio}}{\text{Comprimento.da.linha.de.água} \times Am}$$

2 - CENTRO DE GRAVIDADE (G) E CENTRO DE IMPULSÃO (B)

O ponto G representa o centro de gravidade do navio, onde está aplicado o peso do navio e o ponto B o centro de aplicação da impulsão. A estabilidade dos navios está relacionada com a posição relativa entre estes dois pontos, quando o navio sofre adornamentos. Considerando que um navio é adornado devido a uma força exterior, como o vento, por exemplo:

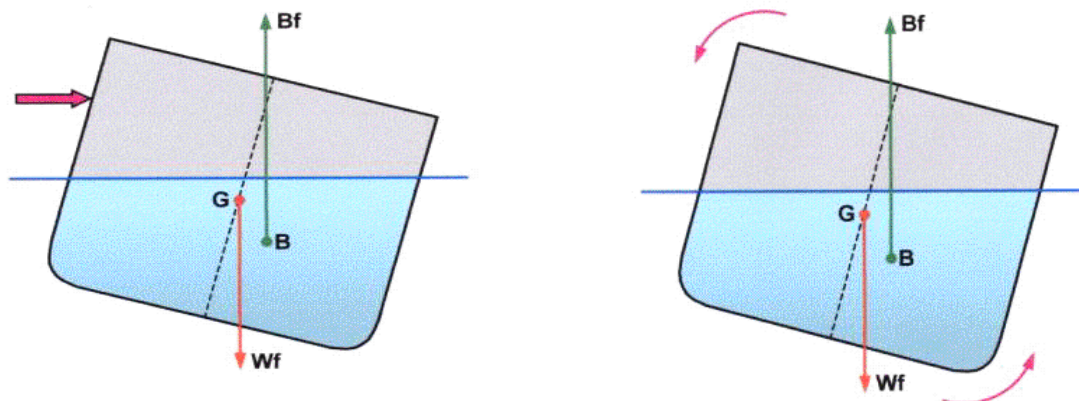


Fig. 2.1 – Posição relativa entre o centro de aplicação do peso e o da impulsão.

Assim que a força exterior deixa de actuar, o navio retornará á posição inicial devido ao momento endireitante resultante da não linearidade das linhas de acção do peso e da impulsão:

2.1 - Centro de gravidade

O centro de gravidade de um navio é definido como sendo o ponto onde todo o peso do navio está aplicado. Durante o estudo da estabilidade considera-se que todo o material do navio está devidamente seguro, de modo a que a posição do ponto G não varia durante os adornamentos do navio

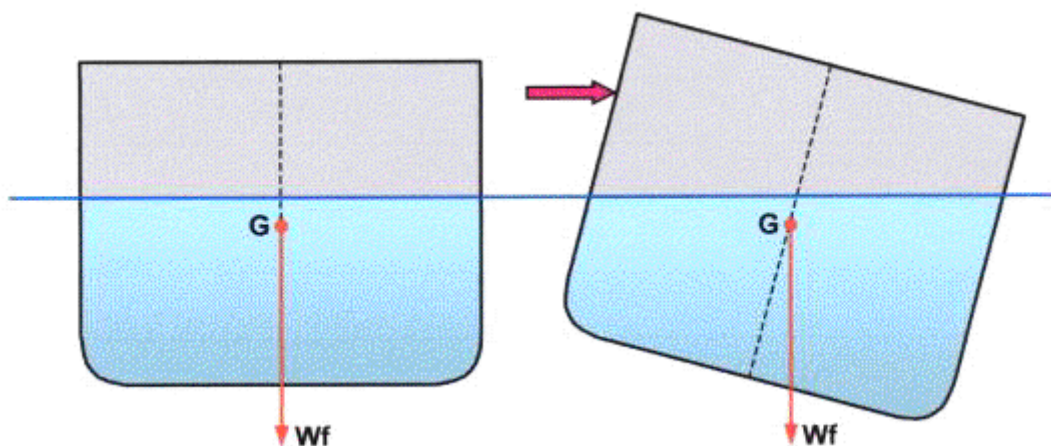


Fig. 2.2 – A posição do ponto G durante os adornamentos do navio.

Quando são adicionados ou retirados pesos a bordo dos navios o ponto G desloca-se. A posição vertical do centro de gravidade (G) é expressa normalmente em relação à quilha (K) do navio e a sua distância (KG) em metros.

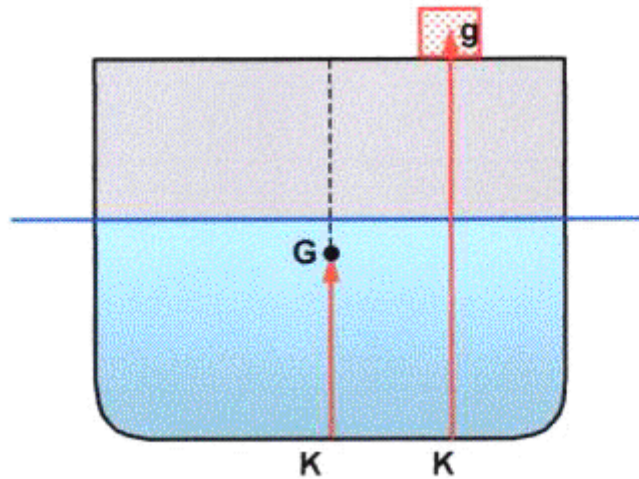


Fig. 2.3 – Posição vertical dos centros de massa do navio e de pesos a bordo.

Quando um peso existente a bordo é deslocado no interior do navio o ponto G move-se paralelamente e na mesma direcção do movimento do centro de massa desse peso:

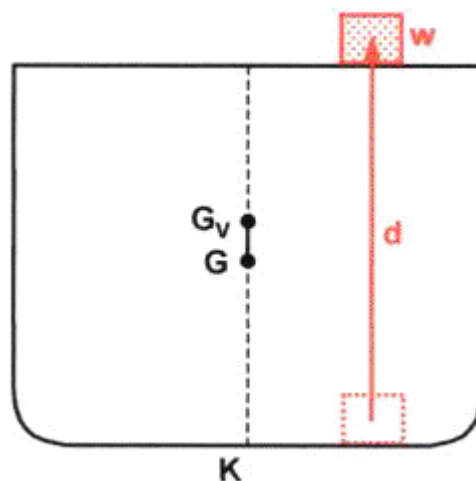


Fig. 2.4 – Alteração da posição vertical do ponto G com a deslocação de pesos a bordo.

O deslocamento do ponto G é dado por:

$$GG_V = \frac{w \times d}{W}$$

Em que w é o valor do peso deslocado, d é a distância do deslocamento do peso e W é o deslocamento do navio (incluindo o corpo deslocado).

No caso de ser adicionado pesos a bordo, o ponto G move-se na direcção do centro de gravidade do corpo embarcado:

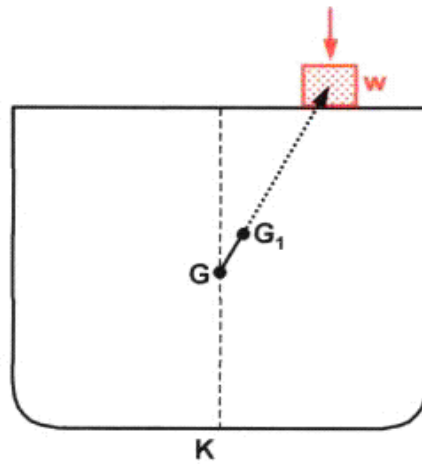


Fig. 2.5 – Adição de peso a bordo.

Para efeitos de cálculo o movimento do ponto G para G1 é considerado como tendo duas componentes: GG_V componente vertical e G_VG_H a componente horizontal.

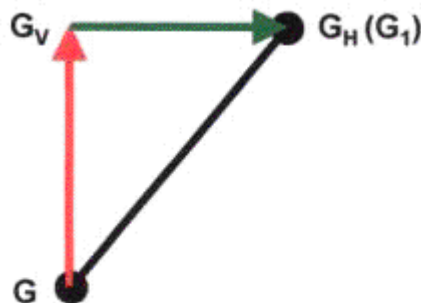


Fig. 2.6 – Componentes do movimento do ponto G.

A este nível só a componente vertical será considerada, pois só esta componente afecta o KG. Neste caso o KG do navio aumentará.

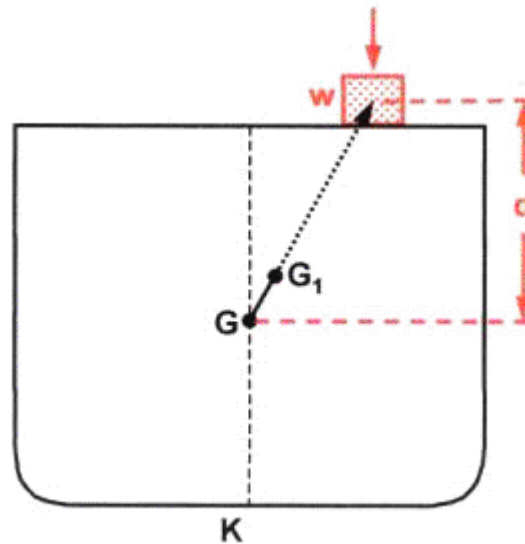


Fig. 2.7 – Adição de peso: esquema de cálculo da componente vertical.

A componente vertical da alteração do ponto G é dada pela fórmula:

$$GG_V = \frac{w \times d}{W + w}$$

Onde w é o peso embarcado em toneladas (t), d a distância vertical entre o ponto G e o centro de massa do corpo embarcado (m), e W o deslocamento inicial do navio (t). No caso de se retirar peso do navio o ponto G move-se na direcção entre o ponto G e

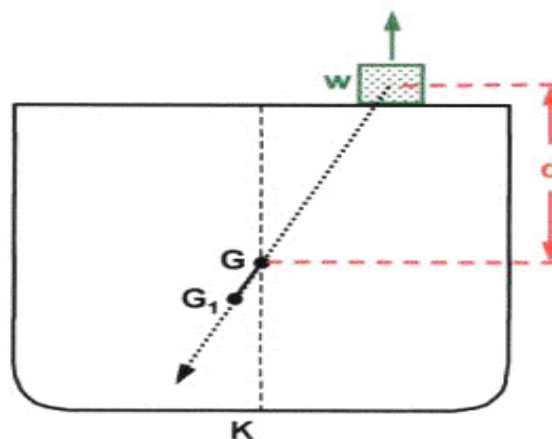


Fig. 2.8 – Remoção de peso: esquema de cálculo da componente vertical.

o centro de massa do corpo desembarcado mas no sentido contrário do caso anterior:

Neste caso o KG do navio irá diminuir.

A componente vertical do movimento do ponto G é calculada pela fórmula:

$$GG_v = \frac{w \times d}{W - w}$$

Em que w é o peso desembarcado (tons), d a distância vertical entre G e o centro de massa do corpo (m) e W o deslocamento inicial do navio (t).

Na prática torna-se muito mais fácil calcular o KG final dos navios através da utilização da definição de momento:

$$\text{Momento}(t.m) = \text{Deslocamento}(t) \times \text{Distância}(m)$$

Em que no caso de navios toma a forma:

$$GG_v(m) = \frac{\text{Momento}(t.m)}{\text{Deslocamento.final}(t)}$$

Quando um certo número de pesos mudam de posição, são embarcados e/ou desembarcados, os momentos de cada peso são calculados e são somados, e depois divide-se pelo deslocamento final do navio, de modo a obter-se a distância GG_v final.

2.2 - Centro de impulsão (centro do volume de liquido deslocado)

O centro de impulsão de um navio é o centro geométrico do volume imerso do navio num determinado instante e é o ponto de aplicação da força de impulsão que a água exerce sobre o navio, e actua verticalmente de baixo para cima. A sua posição move-se constantemente á medida que o navio tem movimentos de balanço, e/ou de cabeceio e/ou de arfagem, ao contrário do centro de gravidade (G) que se mantém constante (desde que não haja movimentos de pesos no seu interior).

Se o deslocamento (e imersão) do navio alterar, a posição do centro do volume imerso (centro de impulsão) também altera. A posição vertical do centro de impulsão é

designada por KB, e corresponde à distância vertical desde a quilha do navio (ponto K) ao centro de impulsão (ponto B).

No caso de um objecto prismático regular a distância KB corresponde a metade da imersão.

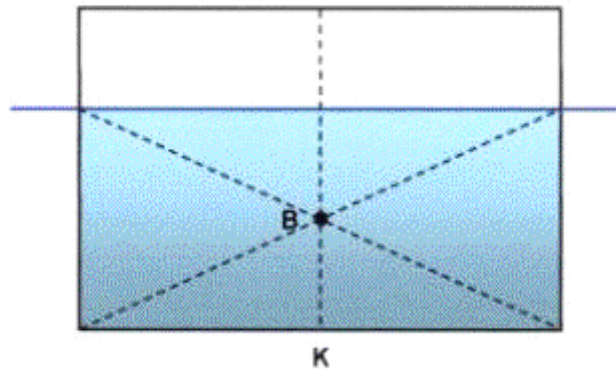


Fig. 2.9 – Localização do centro de impulsão (B) de um objecto prismático flutuante.

3- INTRODUÇÃO À ESTABILIDADE ESTÁTICA TRANSVERSAL

A estabilidade estática transversal é um termo utilizado para descrever a capacidade de um navio para retornar à posição de direito (inclinação transversal=0°), depois de ter sido forçado a adormar por uma força exterior.

Quando um navio sofre um adormamento no mar devido à acção do vento e/ou da ondulação marítima (ou num rio) a situação resultante de estabilidade transversal pode ser diferente da registada em águas calmas.

É através da posição relativa entre o centro de gravidade (G) e o centro de impulsão (B) resultante de determinado adormamento do navio, que se determina o nível de estabilidade do navio.

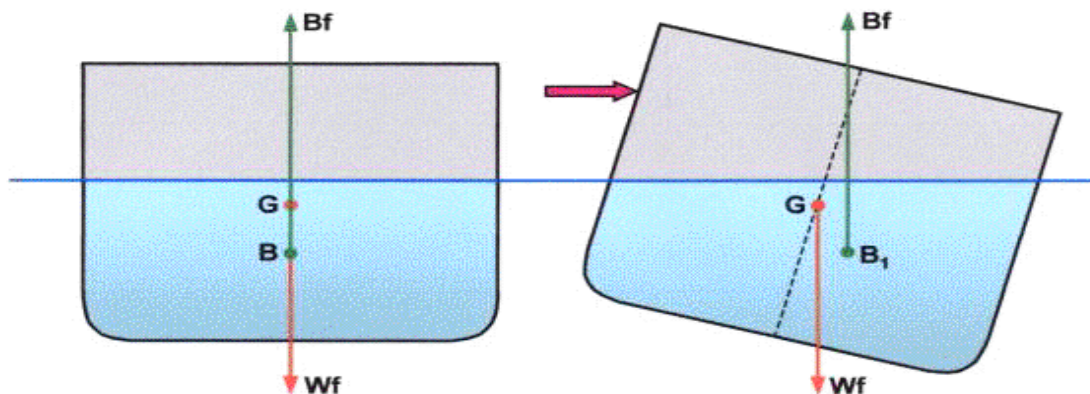


Fig. 3.1 - O navio retorna à sua posição inicial, devido à acção das forças que actuam em G e em B, quando a força externa é removida.
[Rhodes, Martin (2003)]

3.1 - Braço endireitante (GZ)

O braço endireitante é definido como a distância horizontal, medida em metros, entre o centro de gravidade (G) e a linha vertical de acção da impulsão (B_f) que actua a partir do centro de impulsão (B_1) quando o navio adorna.

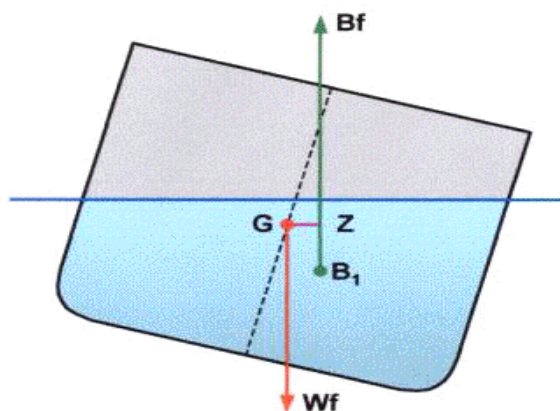


Fig. 3.2 – Braço endireitante (GZ).
[Rhodes, Martin (2003)]

O braço endireitante (GZ) aumenta até um valor máximo e depois decresce à medida que o navio adorna progressivamente.

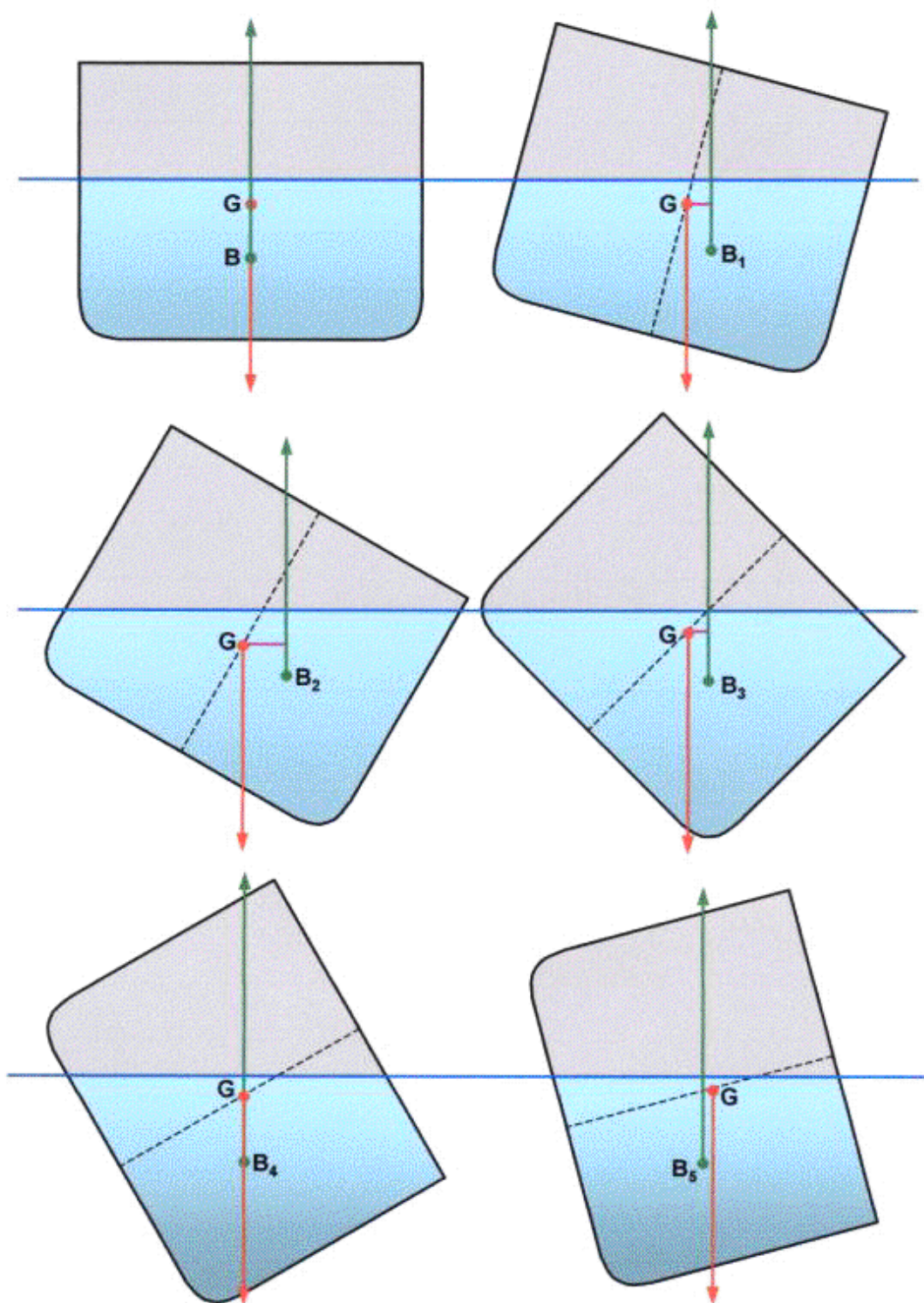


Fig. 3.3 – Alteração do braço endireitante com o adornamento do navio.
[Rhodes, Martin (2003)]

Os braços endireitantes para ângulos específicos de adornamento são representados na Curva de estabilidade transversal, também conhecida como Curva GZ:

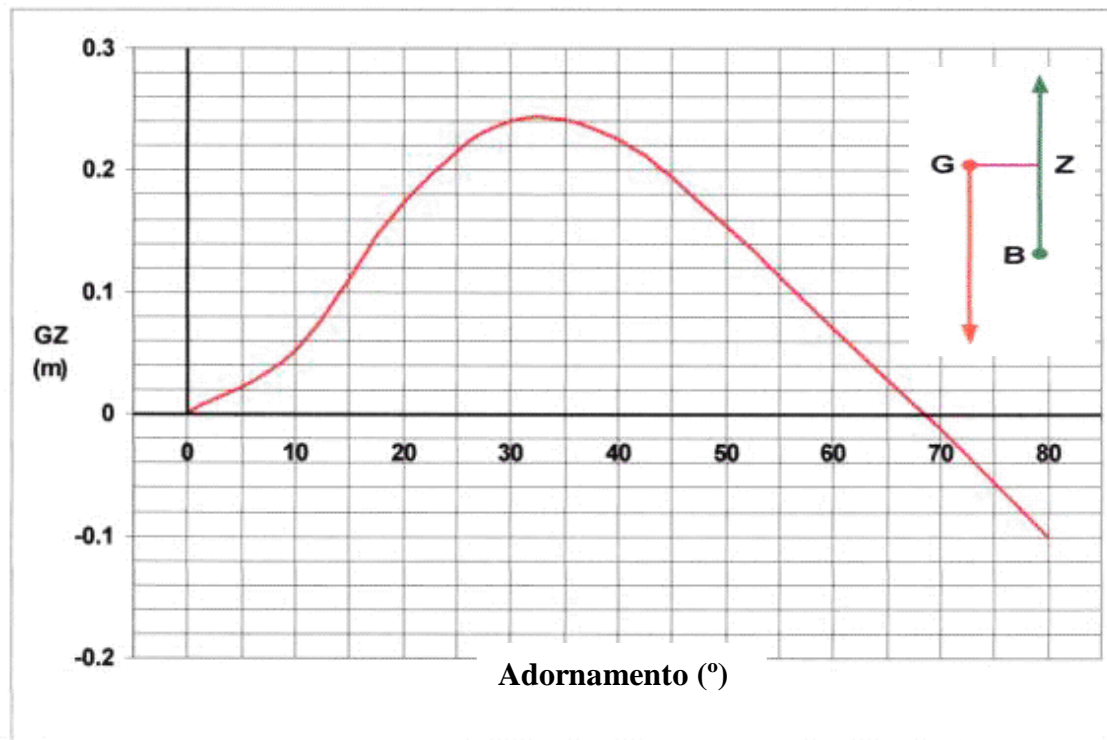


Fig. 3.4 – Curva de estabilidade transversal ou curva GZ.
[Rhodes, Martin (2003)]

3.2 - Momento endireitante

O momento endireitante, para qualquer ângulo de adornamento é dado pela seguinte fórmula:

$$\text{Momento Endireitante (t.m)} = \text{GZ (m)} \times \text{Deslocamento (t)}$$

que resulta da acção da força de impulsão (que é igual ao peso W_f do navio) cuja linha de acção passa no extremo do braço endireitante (ponto Z), e o ponto de rotação é o ponto G.

O momento endireitante referido a um determinado ângulo de adornamento, representa o valor instantâneo da capacidade do navio de regressar à posição de direito, e é expresso em toneladas x metro, quando o navio se encontra em “águas calmas” (considerando unicamente o movimento de balanço transversal).

3.3 - Metacentro inicial transversal (M)

O Metacentro inicial transversal corresponde ao ponto de intercepção de linhas sucessivas de acção da força de impulsão (B_f) à medida que o navio adorna para um ou outro bordo. Assume-se que o ponto M tem uma posição fixa para ângulos pequenos de adornamento (até 10°) – por isso a denominação de Metacentro inicial transversal. Para ângulos maiores o ponto M muda de posição, como se verá mais adiante.

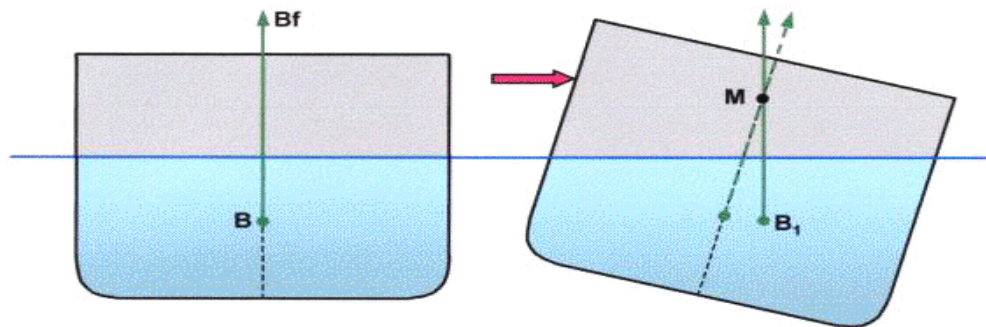


Fig. 3.5 – Metacentro transversal inicial (M).

A posição do Metacentro inicial é expressa como a altura acima da quilha, em metros, e é denominada por KM. O valor de KM é tabelada na carta das curvas hidrostáticas do navio e a sua posição varia com a imersão do navio (ou seja, com o deslocamento).

3.4 - Altura metacêntrica (GM)

A altura metacêntrica é a distância vertical entre o centro de gravidade do navio (G) e o metacentro inicial transversal (M).

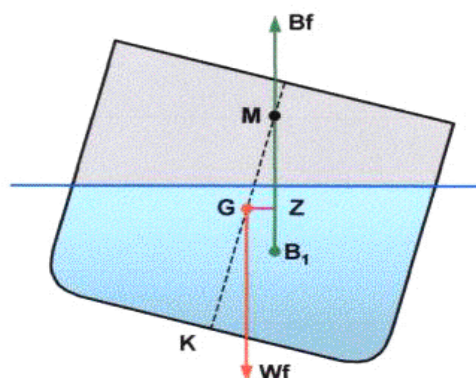


Fig. 3.6 – Altura metacêntrica transversal (GM).

A distância GM é importante para a determinação da estabilidade inicial do navio, ou seja, da estabilidade do navio para pequenos ângulos de adornamento.

Se o centro de gravidade G subir, o braço endireitante GZ diminui, bem como o momento endireitante, e o navio torna-se menos estável (menor altura metacêntrica GM).

Se o centro de gravidade G baixar, o braço endireitante GZ aumenta, bem como o momento endireitante, e o navio torna-se mais estável (maior altura metacêntrica GM).

$$KM - KG = GM$$

Se o ponto M estiver acima do ponto G o navio estará numa condição estável, ou seja, terá estabilidade positiva, e este é o objectivo a atingir em qualquer tipo de navio.

3.5 - Cálculo do momento de estabilidade transversal para pequenos ângulos de adornamento

Do triângulo GZM temos:

$$GZ = GM \times \sin \theta$$

pelo que

$$\text{Momento Endireitante} = GZ \times \text{Deslocamento}$$

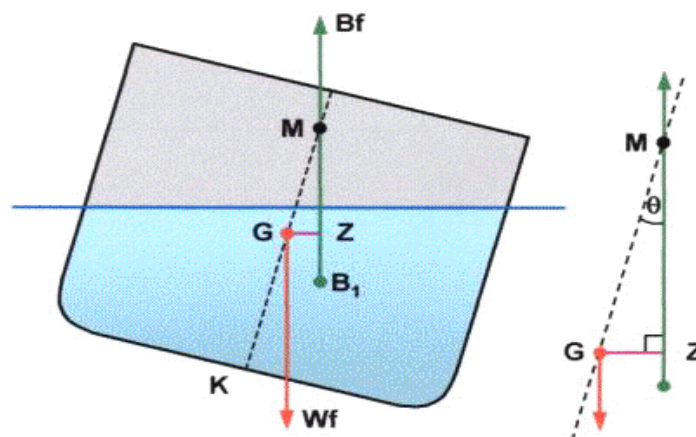


Fig. 3.7 – Triângulo GZM.
[Rhodes, Martin (2003)]

3.6 - Condições de estabilidade

3.6.1- Estabilidade positiva

Um navio tem estabilidade positiva, se quando sujeito a uma força externa em águas calmas, adorna até um ângulo pequeno e depois da força actuar, retorna à sua posição original. O valor de GM é positivo (M está acima de G):

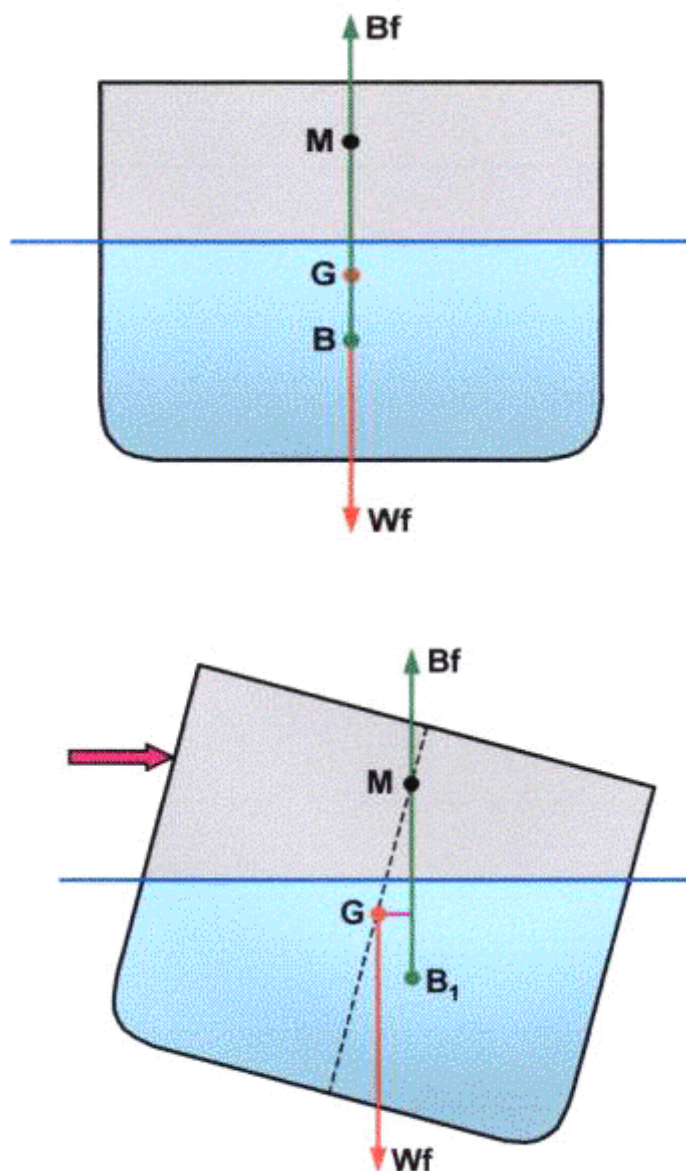


Fig. 3.8 – Altura Metacêntrica positiva.
[Rhodes, Martin (2003)]

Como se verifica pela última figura o momento endireitante actua de modo a retornar o navio à sua posição inicial.

3.6.2 - Estabilidade neutra

Um navio possui estabilidade transversal neutra, se após ter sido sujeito a uma força externa em águas calmas, fica com um ângulo de adornamento indeterminado.

Neste caso $KM-KG=0$, isto é: $GM=0$.

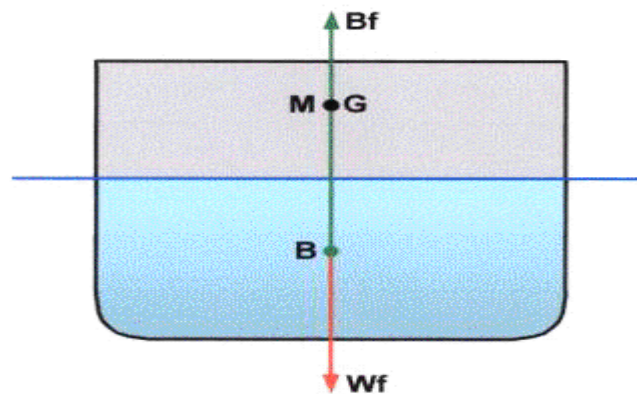


Fig. 3.9 – Altura Metacêntrica nula.

Como o navio não possui braço endireitante GZ , o ponto G está à mesma altura que o ponto M .

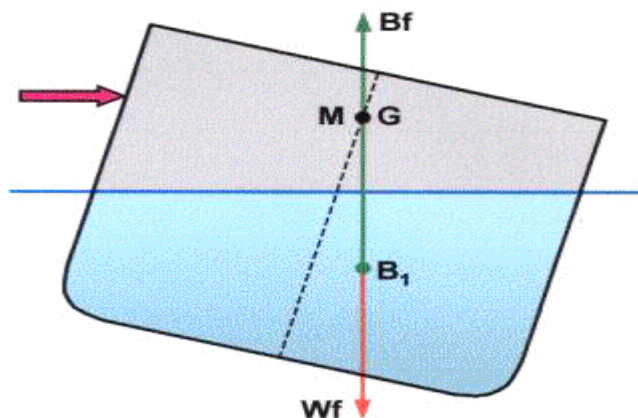


Fig. 3.10 – Estabilidade transversal nula.

Se o navio sofrer ângulos de adornamento maiores, o centro de impulsão B desviar-se-à da linha de direcção do deslocamento, o que provocará um braço endireitante GZ

positivo pelo que o navio tenderá para um pequeno ângulo indeterminado de adornamento, assim que a força exterior desaparecer.

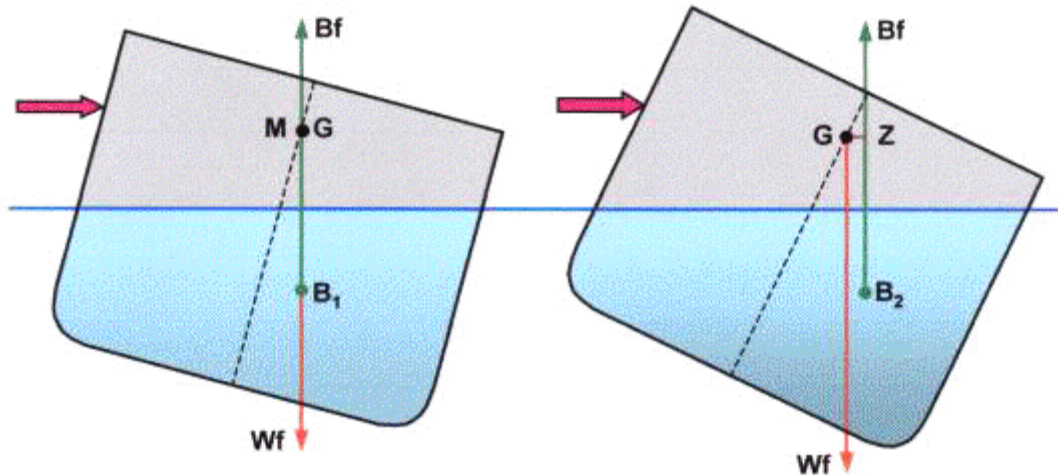


Fig. 3.11 – Estabilidade transversal nula.
[Rhodes, Martin (2003)]

3.6.3 - Estabilidade negativa

Um navio encontra-se instável em termos de estabilidade transversal, se quando adornado até pequenos ângulos, por uma força externa, continuar a adornar mesmo depois de cessar essa força. O valor da altura metacêntrica GM é negativo. O navio adorna até um determinado ângulo, em que a linha de ação do seu peso e da impulsão coincidirem. Se o ponto G estiver muito acima do ponto M existe o risco do navio continuar a adornar até “dar a cambalhota”.

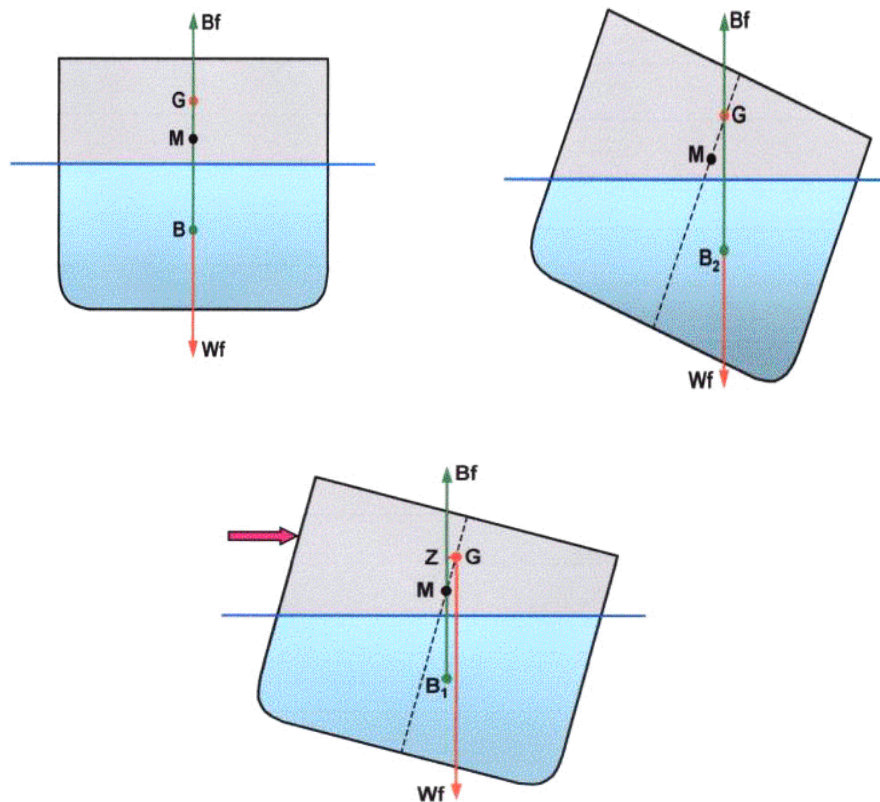


Fig. 3.12 – Estabilidade transversal negativa.
[Rhodes, Martin (2003)]

O efeito dos espelhos líquidos (fluidos no interior de tanques não totalmente cheios), no interior dos navios são a principal causa de instabilidade, como se verá mais adiante neste texto.

3.7 - Metacentro transversal inicial

Durante o projecto de um navio há que ter em consideração os factores que influenciam a altura metacêntrica. Para um determinado valor de KG quanto maior for o valor de KM , maior será o valor da altura metacêntrica GM . É importante realçar que a altura do centro de gravidade KG , somente, não é factor influenciador da estabilidade inicial de um navio. Será visto posteriormente que o KM varia com a imersão, ou seja com o deslocamento do navio – para um determinado valor de KG pode-se obter uma

adequada estabilidade inicial relacionado com o GM com uma particular imersão, mas não com outra imersão.

3.7.1- Metacentro transversal inicial

O metacentro transversal inicial corresponde ao ponto de intercepção das linhas de acção do peso com a impulsão, quando o navio depois de estar na posição de direito è adornado para pequenos ângulos de inclinação.

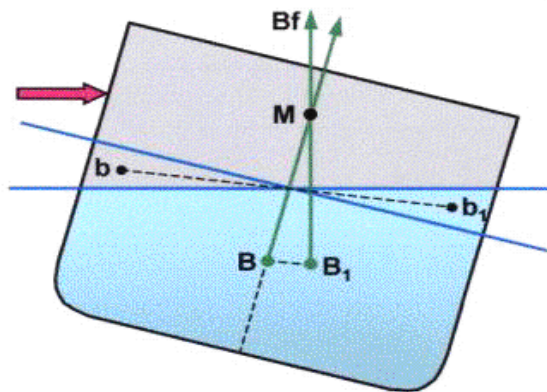


Fig. 3.13 – Metacentro transversal inicial.
[Rhodes, Martin (2003)]

Pela figura anterior pode-se ver que um determinado volume de imersão (em forma de cunha), foi transferido do bordo mais alto para o bordo adornado (bb₁).

O movimento resultante da mudança de B para B₁ é paralelo ao deslocamento do centróide do volume de imersão deslocado (v).

O deslocamento BB₁ pode ser calculado da seguinte maneira:

$$BB_1 = \frac{v \times bb_1}{V}$$

Em que v é o volume de liquido deslocado com a forma de cunha, bb₁ é distância entre os centróides dos volumes v e V é o volume de liquido deslocado devido ao deslocamento do navio.

Onde I é o momento de inércia (2º momento de inércia) da área de flutuação (*water-plane area*) em relação ao eixo longitudinal de rotação que passa pelo centro da área de flutuação, e V é o volume de líquido deslocado devido ao deslocamento do navio.

3.7.4- Momento de inércia (2º momento de inércia) da área de flutuação

Considere-se a seguinte área de flutuação:

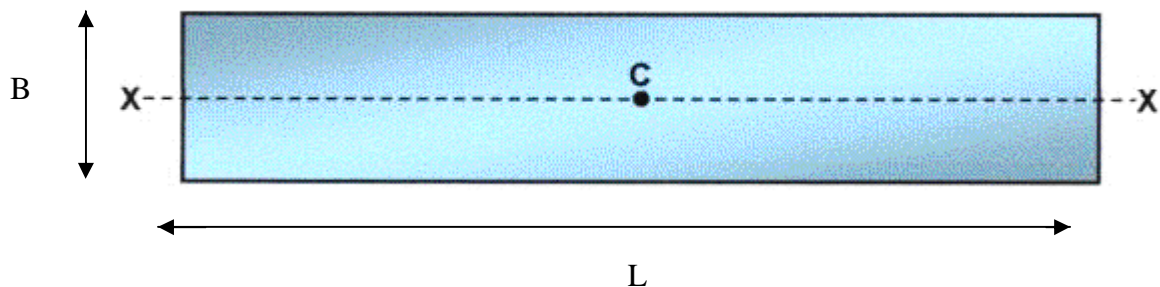


Fig. 3.15 – Representação de uma área prismática de flutuação.

Em que C é o centro geométrico da área de flutuação e XX é o eixo longitudinal de rotação (na realidade o navio adorna sobre este eixo de rotação). Para o caso desta forma prismática temos que:

$$I = \frac{LB^3}{12}$$

Onde L é o comprimento da área de flutuação, B a largura ou boca na área de flutuação e I o momento de inércia de 2ª ordem e é expressa em m^4 .

Pela conjugação das últimas duas fórmulas temos que:

$$BM_{BOX} = \frac{B^2}{12d}$$

Em que d é a imersão do navio.

Uma maneira simplista, mas conveniente, é considerar que o momento de inércia de 2ª ordem da área de flutuação está relacionado com a resistência ao adorno do navio.

Assim em síntese temos, para a forma prismática regular, que:

$$KM = KB + BM$$

$$KM_{\text{BOX}} = \frac{d}{2} + \frac{B^2}{12d}$$

3.7.5- Diagramas metacêntricos

A seguinte figura dá-nos uma ideia como o valor de KM varia com a imersão:

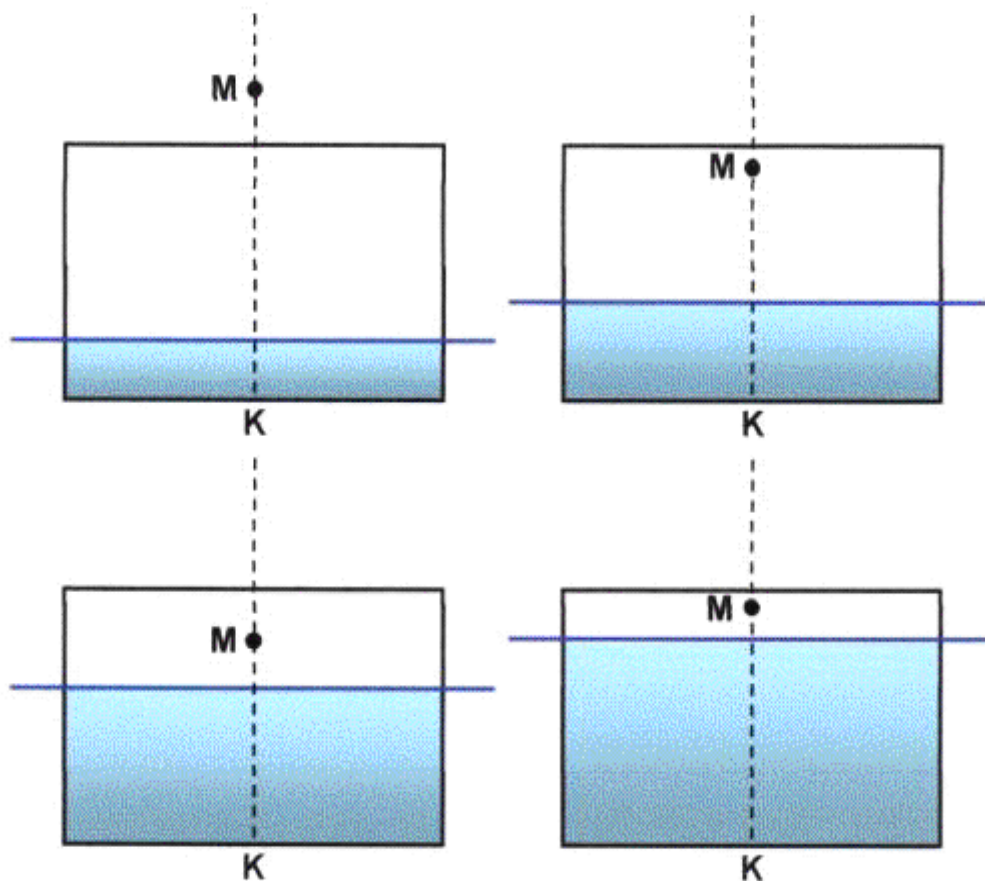


Fig. 3.16 – Variação de KM com a imersão.
[Rhodes, Martin (2003)]

Se fôr traçado um gráfico com a imersão d nas abcissas e o KM nas ordenadas, e se fôr colocado o valor de um determinado KG (linha horizontal) a partir da escala nas ordenadas, obtém-se, por exemplo o seguinte gráfico:

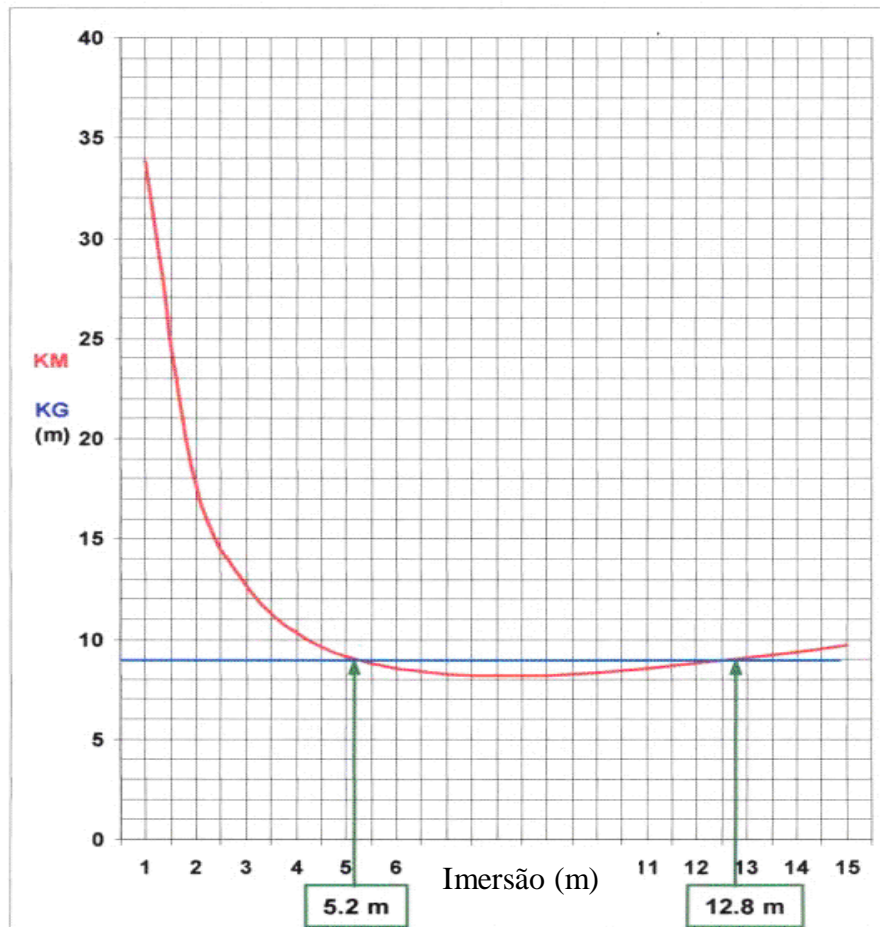


Fig. 3.17 – Gráfico de KM em função de d (KG fixo).
[Rhodes, Martin (2003)]

Através da observação do gráfico constata-se que:

- para $KG=9$ m, o navio torna-se instável com uma imersão entre os 5.2 e os 12.8 m (a condição de estabilidade positiva implica que o KM deve ser maior do que o KG);
- com uma imersão menor que os 5.2 m o navio encontra-se numa situação de estabilidade positiva.

3.7.6.2- Imersão do navio

Considerando a fórmula anterior é fácil verificar que se o deslocamento aumentar, e assim a imersão do navio, o KM diminui e vice-versa.

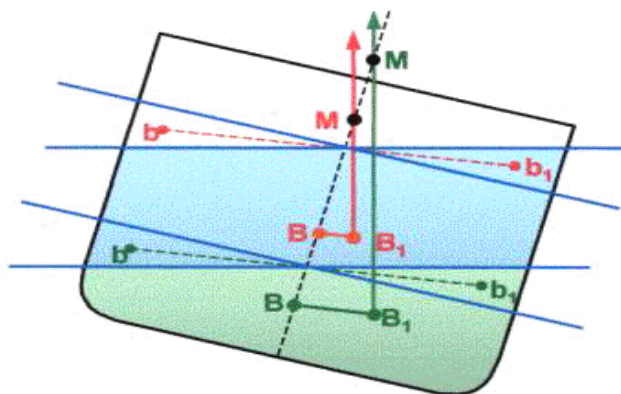


Fig. 3.19 – Variação da altura do metacentro (KM) com a imersão do navio.
[Rhodes, Martin (2003)]

4- O EFEITO DOS ESPELHOS LIQUIDOS (Superfícies livres) NA ESTABILIDADE TRANSVERSAL

A maior parte dos casos de instabilidade de navios resultam dos efeitos dos espelhos líquidos e das superfícies livres. Isto ocorre quando os tanques no interior do navio estão parcialmente cheios, e quando o navio adorna, o líquido no interior dos tanques move-se para a zona baixa, o que afecta bastante a estabilidade transversal.

Considere a seguinte figura em que o tanque está parcialmente cheio com um líquido congelado no seu interior, e o navio sofre uma pequena inclinação:

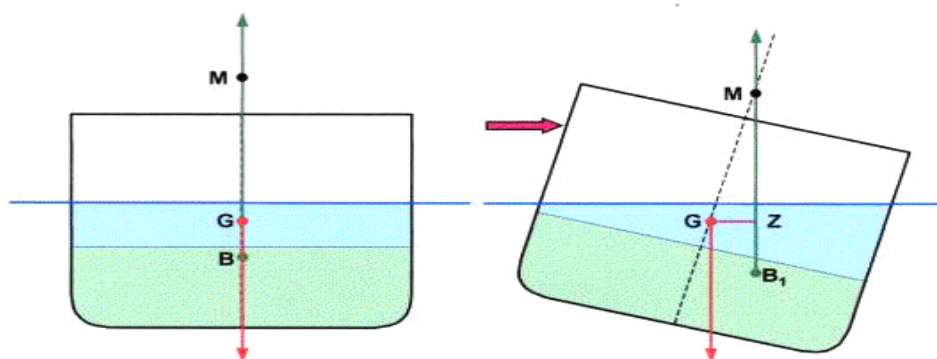


Fig. 4.1 – Adornamento com líquido congelado no interior.
[Rhodes, Martin (2003)]

Na condição de inclinado a distância GZ corresponde ao braço endireitante. Devido ao facto do líquido se encontrar congelado, a sua acção é idêntica a um peso estático (e devidamente amarrado), pelo que não se move.

Vamos agora perceber o que acontece se o líquido se mover à medida que o navio adorna, o que é normalmente o caso. Na condição de direito tudo parece ser normal.

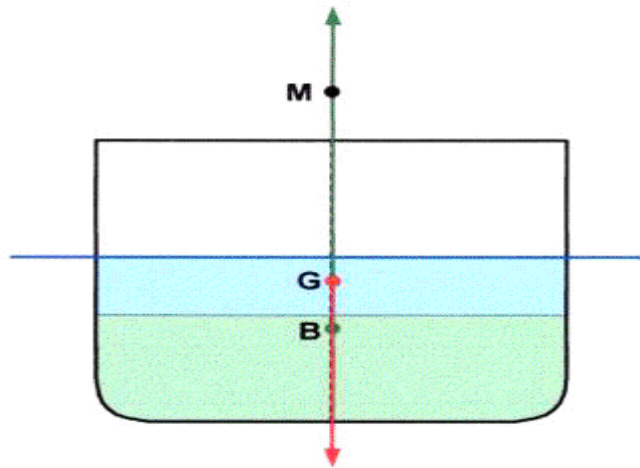


Fig. 4.2 – Líquido no interior: posição de navio direito.
[Rhodes, Martin (2003)]

Quando uma força externa actua sobre o navio, uma cunha de líquido é transferida para o lado baixo do navio (gg_1). Desde que algum peso é transferido, o ponto G move-se paralelamente e na mesma direcção do deslocamento do peso (do líquido) – GG_1 , o que provoca a redução do braço endireitante de GZ para G_1Z_1 .

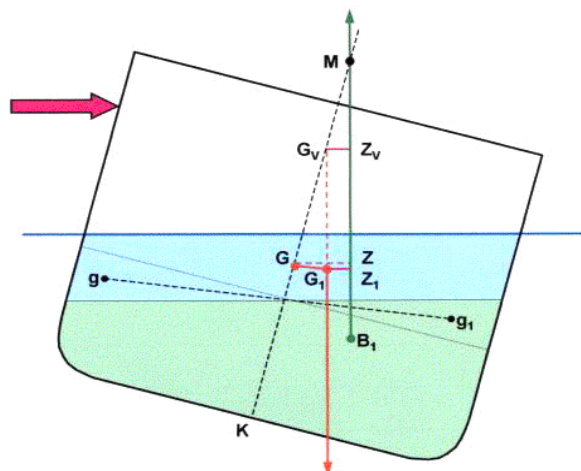


Fig. 4.3 – Líquido no interior: posição de navio adornado.
[Rhodes, Martin (2003)]

O braço endireitante G_1Z_1 é o mesmo se o ponto G tivesse subido para G_v . A distância GG_v representa a subida virtual do ponto G resultante do efeito do espelho líquido (o ponto G não sobe realmente, mas o movimento do líquido no interior do tanque tem o mesmo efeito nos valores de GZ como se G tivesse subido – daqui a designação de “subida virtual de G”).

Quando se calcula a altura metacêntrica GM de um navio, é importante ter em consideração o efeito cumulativo dos espelhos líquidos. Quando o navio retorna à sua posição inicial de direito, o centro de gravidade (G_1) retorna à sua posição original G, assim como o líquido.

Para um tanque com a forma rectangular, a subida virtual de G, em metros, é calculada através de:

$$GG_v = \frac{lb^3}{12} \times \frac{dt}{W}$$

Onde l é o comprimento do tanque em metros, b a sua largura em metros, dt a densidade do líquido em Kg/m^3 e W o deslocamento do navio em Kg.

O momento de inércia (I), também chamado momento de 2ª ordem ou momento de área, do espelho líquido de um tanque rectangular pode ser determinado através de:

$$I = \frac{lb^3}{12} (\text{M}^4)$$

E se o valor de I for multiplicado pela densidade do líquido então obtém-se o valor de momento do espelho líquido (“Free Surface Moment – FSM”):

Ou seja

$$GG_v = \text{FSM's} / \text{deslocamento}$$

$$KG = \text{soma dos momentos} / \text{deslocamento}$$

$$\text{FSM's (t-m)} = \frac{lb^3}{12} \times dt$$

Nos navios existem tabelas representativas do efeito dos espelhos líquidos, cujo objectivo é calcular a altura metacêntrica final do navio, através do cálculo dos momentos dos espelhos líquidos.

Como vimos, os factores que influenciam o efeito dos espelhos líquidos são: o comprimento e a largura dos tanques, a densidade do liquido e o deslocamento do navio.

A partir da fórmula:

$$GG_V(m) = \frac{lb^3}{12} \times dt$$

Pode-se verificar que a largura dos tanques é o factor mais importante. Se os tanques forem subdivididos, a perda do GM pode ser bastante reduzida (o momento do espelho liquido FSM reduz substancialmente). A figura seguinte mostra um tanque sem divisão, com uma divisão e com duas divisões.

Com uma divisão o momento do espelho líquido (e a perda de GM) é reduzido para um quarto do valor original, enquanto que com duas divisões é reduzido para um nono do valor original (sem divisões).

Para n divisões a redução é de $1/n^2$. Por exemplo para uma divisão do tanque em quatro tanques iguais a redução da FSM é de 1/16.

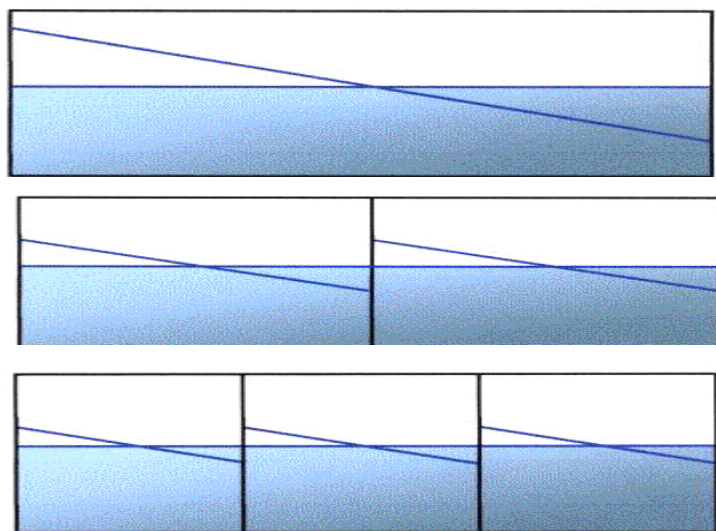


Fig. 4.4 – Formas de divisão interior dos tanques.

É usual subdividir os tanques em três compartimentos no máximo, pois o benefício de melhorar a altura metacêntrica GM é contrariado pelo aumento do peso do aço necessário e dos custos associados aos encanamentos necessários.

5- CURVAS DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL (CURVAS GZ)

A curva da estabilidade transversal, ou curva GZ como é normalmente conhecida, é uma representação gráfica da estabilidade transversal dos navios. A estabilidade transversal é um termo utilizado para descrever a capacidade de um navio em retornar à posição de direito após ter sofrido um determinado adorno devido à acção de uma força exterior.

$$\text{Momento Endireitante (t-m)} = \text{GZ (m)} \times \text{Deslocamento (t)}$$

A qualquer ângulo de inclinação, é a disposição horizontal dos pontos G e B que determinam o valor de GZ.

À medida que o navio vai progressivamente adornando, o braço endireitante GZ aumenta até atingir um determinado valor máximo e depois decresce até determinado ângulo até atingir o zero, e a partir daí o GZ torna-se negativo, ou seja, o navio fica com tendência a “capotar”.

O gráfico da curva GZ é obtido através de vários ângulos de adorno, para uma determinada condição de carga do navio:

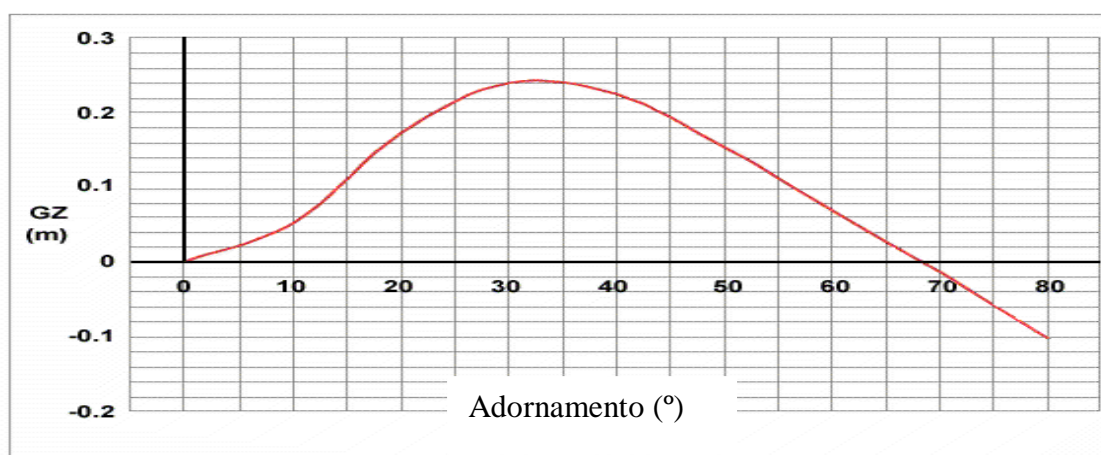


Fig. 5.1 – Curva de estabilidade transversal (curva GZ).

Quanto maiores forem os valores de GZ, maior será a área abaixo da curva.

5.1- Cálculo dos valores de GZ

À medida que um navio adorna, o centro de impulsão B move-se constantemente, ou seja a sua posição transversal depende do volume de deslocamento imerso (e da imersão) e do ângulo de adornamento nesse instante.

O valor de GZ depende predominantemente do KG. Devido às várias posições possíveis do ponto G, é conveniente considerar o valor de GZ como se o ponto G estivesse sobre a quilha, e então com o valor de KN faz-se a correcção para a actual altura do centro de gravidade G. As curvas KN são fornecidas pelos construtores de navios, de modo a se poder determinar os valores de GZ para qualquer deslocamento e KG. Alternativamente os valores de KN podem ser tabelados.

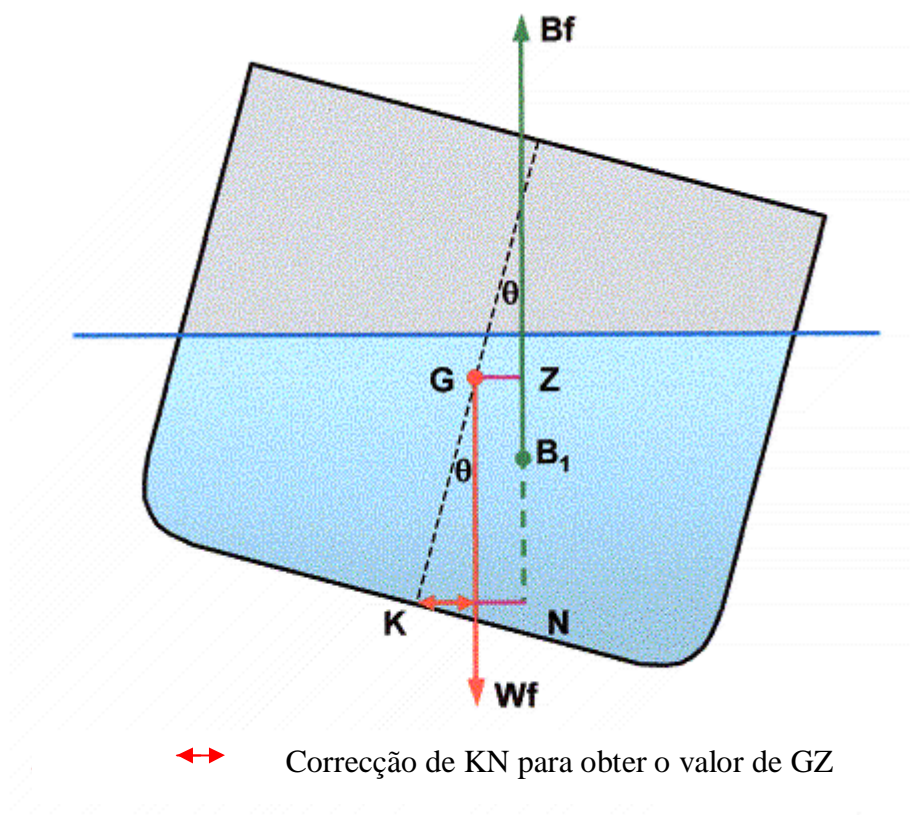


Fig. 5.2 – Representação do KN.
[Rhodes, Martin (2003)]

$$GZ = KN - (KG \cdot \sin \theta)$$

5.2- Procedimento para a construção da curva de estabilidade transversal

Os seguintes passos são importantes quando se constrói uma curva de estabilidade transversal para um navio [D'Oliveira, Rogério (2001)]:

- determinar o deslocamento e o valor efectivo da altura do centro de gravidade (KG) para a condição de carga em estudo (entrando em consideração com o efeito de espelhos líquidos dos tanques);
- a partir das curvas hidrostáticas, retirar o valor de KM (altura do metacentro) para o deslocamento do navio;
- determinar o valor de GM através de:

$$GM = KM - KG(\text{espelhos líquidos})$$

- consultar as curvas de KN (ou tabela) e obter o valor de KN em metros para cada ângulo de adornamento;
- através da fórmula: $GZ = KN - (KG \cdot \sin \theta)$, determinar os valores de GZ para os diversos ângulos de adornamento;
- antes de traçar a curva dos valores de GZ em função dos ângulos de adornamento, traça-se uma linha vertical a $57.3^\circ = 1$ radiano, e a partir da base marca-se o valor de GM (utilizando a escala de GZ) traçando uma linha horizontal. Depois desenha-se uma linha a partir da origem e que passe pelo ponto de intersecção das outras duas linhas. Isto irá indicar a tendência inicial da curva de estabilidade para pequenos ângulos de adornamento.

A seguir dá-se um exemplo de uma curva GZ (para um valor inicial de $GM = 0.54$ m):

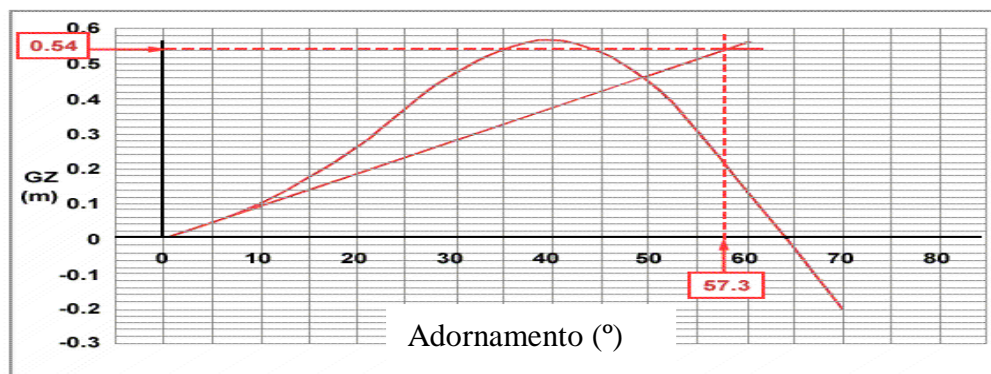


Fig. 5.3 – Exemplo de uma curva de estabilidade para um GM inicial de 0,54m.

5.3- Informação básica obtida a partir da curva de estabilidade transversal

Com recurso ao exemplo anterior, constata-se facilmente que a seguinte informação pode ser extraída a partir da curva GZ [Rawson, K.J. (1984)]:

- a) o valor do braço endireitante GZ para qualquer ângulo de adornamento; e que pode ser usado para calcular o momento endireitante da estabilidade transversal (para esse ângulo) a partir da fórmula:

$$\text{Momento Endireitante (t.m)} = \text{GZ (m)} \times \text{Deslocamento (t)}$$

- b) o máximo valor do braço endireitante GZ e o ângulo de adornamento correspondente;
- c) a gama de estabilidade positiva e o ângulo de estabilidade nula (AVS – *vanishing stability*);
- d) o ângulo aproximado correspondente à borda livre nula – “*deck edge immersion* - θ_{DEI} “.

O ângulo correspondente à borda livre nula é identificado na curva GZ pelo ponto de inflexão da curva, ou seja, quando o sentido da curvatura da curva altera:

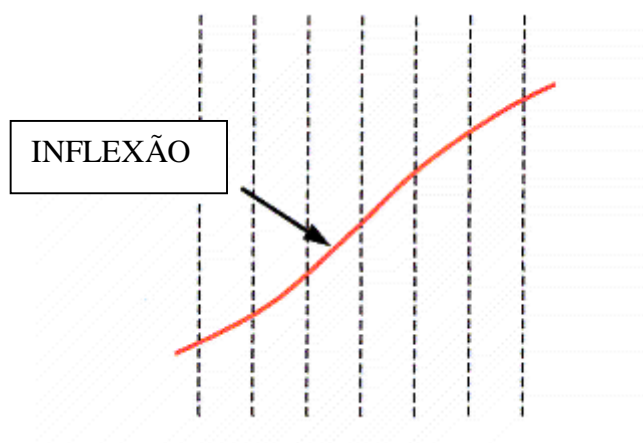


Fig. 5.4 – Alteração do sentido de curvatura da curva de estabilidade transversal, correspondente à borda livre nula.

Considerando a curva dada do exemplo anterior pode-se ver todas estas informações:

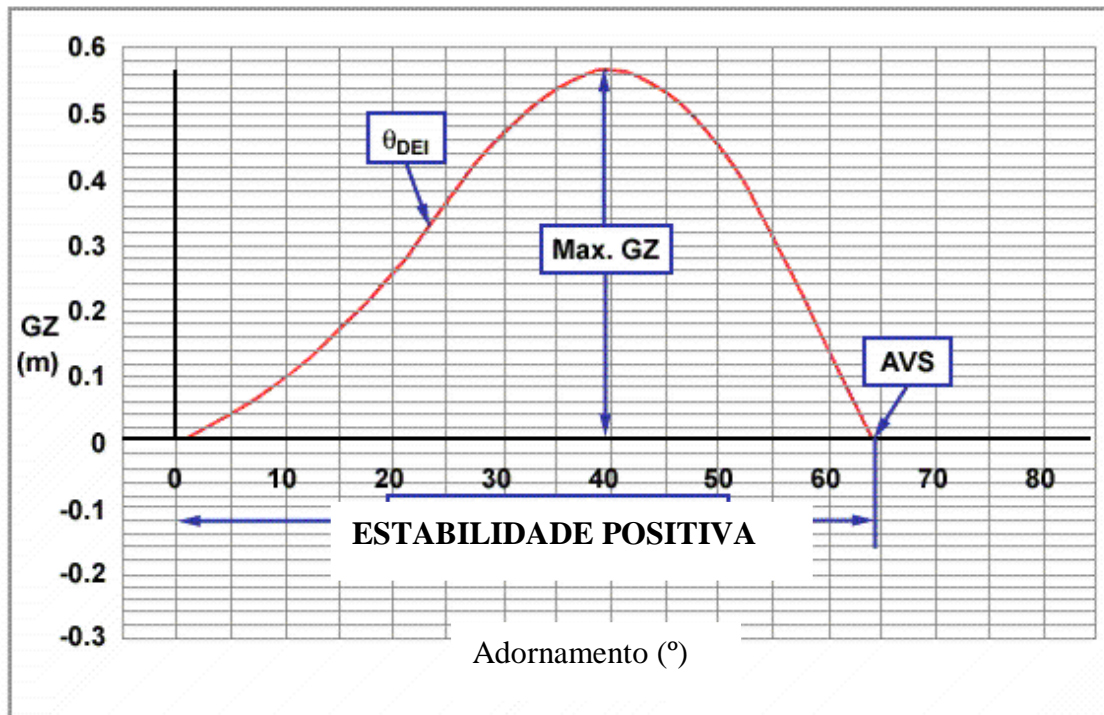


Fig. 5.5 – Algumas informações fornecidas pela curva de estabilidade.
[Rhodes, Martin (2003)]

O valor máximo de GZ é de 0.57 m e ocorre a um ângulo de adornamento aproximado de 39°. A gama de estabilidade positiva ocorre entre os 0° e os 64° (o ângulo de estabilidade nula é de 64°). O ângulo correspondente à borda livre nula é de aproximadamente de 23°.

6- REGRAS DE SIMPSON E ESTABILIDADE DINÂMICA

6.1- Regras de Simpson para cálculo de áreas delimitadas por curvas

As regras de Simpson providenciam meios simples para cálculo de áreas delimitadas por curvas, sem recurso a técnicas de integração [Rhodes, Martin (2003)].

Existem duas regras apropriadas para o cálculo da área abaixo da curva de estabilidade transversal.

6.1.1- Primeira regra de Simpson

Considere-se a forma simples:

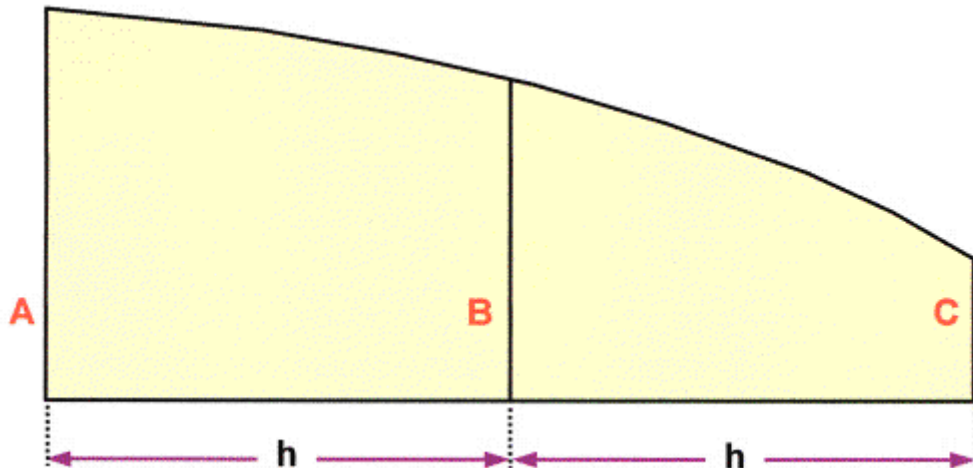


Fig. 6.1 – Figura para aplicação da primeira regra de Simpson.

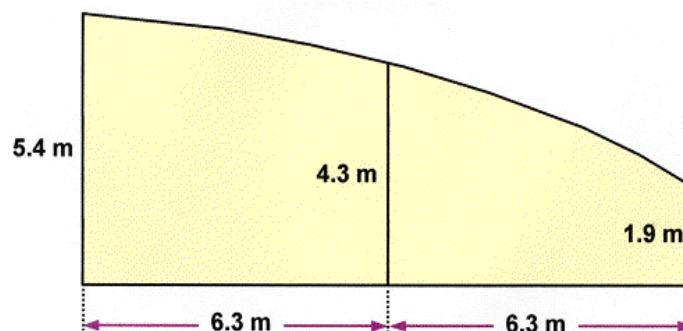
[Rhodes, Martin (2003)]

A, B e C são conhecidas como ordenadas, em que o seu comprimento é expresso em metros. O espaço entre coordenadas deve ser o mesmo, em que h é a distância entre as ordenadas, conhecido como intervalo comum (em metros). A área é dada por:

$$\text{AREA} = \frac{1}{3} \times h \times (1A + 4B + 1C)$$

Em que os números 1, 4 e 1 são conhecidos por multiplicadores de Simpson.

Exemplo:



$$\text{Área} = \frac{1}{3} \times h \times (1A + 4B + 1C)$$

$$\text{Área} = \frac{1}{3} \times 6.3 \times [(1 \times 5.4) + (4 \times 4.3) + (1 \times 1.9)]$$

$$\begin{aligned} \text{Área} &= 2.1 \times (5.4 + 17.2 + 1.9) \\ \text{Área} &= 51.45 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

6.1.1.1- Extensão da primeira regra

Considere-se a forma de metade da área de flutuação de um navio:

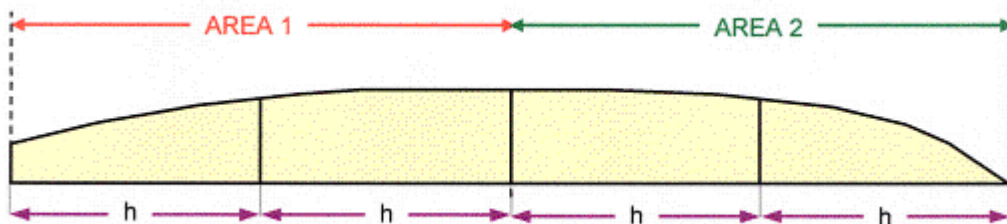
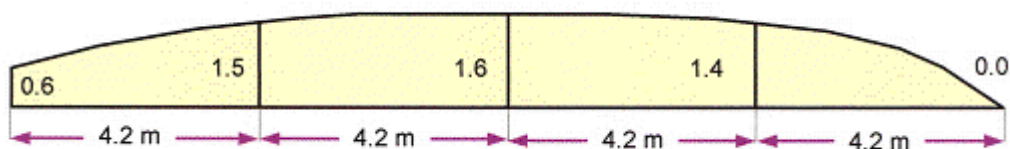


Fig. 6.2 – Figura para aplicação da extensão da primeira regra de Simpson.
[Rhodes, Martin (2003)]

A área possui 4 ordenadas. Uma maneira simples de cálculo de toda a área seria a divisão dessa área em duas áreas mais pequenas, e utilizar a primeira regra para o cálculo das áreas separadamente, e depois somá-las para calcular a área total. No entanto é mais conveniente considerar os multiplicadores de Simpson para ambas as áreas.

Exemplo:



$$\begin{aligned} \text{Area} &= 1/3 \times h \times (1A + 4B + 2C + 4D + 1E) \\ \text{Area} &= 1/3 \times 4.2 \times [(1 \times 0.6) + (4 \times 1.5) + (2 \times 1.6) + (4 \times 1.4) + (1 \times 0.0)] \\ \text{Area} &= 2.1 \times (5.4 + 17.2 + 1.9) \\ \text{Area} &= 21.56 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Pode-se usar, no entanto, mais ordenadas e mais multiplicadores de Simpson para um cálculo mais rigoroso das áreas.

6.1.2- Segunda regra de Simpson

Considere-se a seguinte forma:

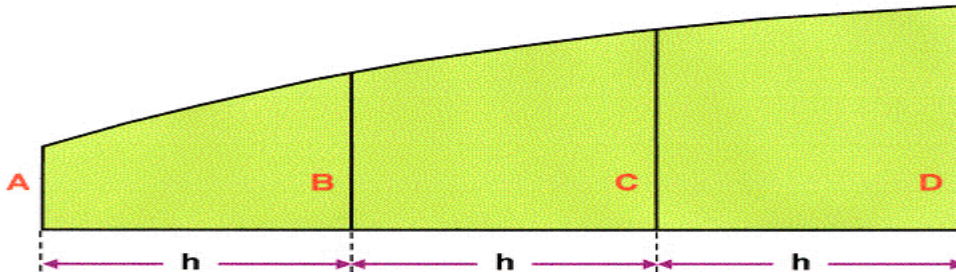


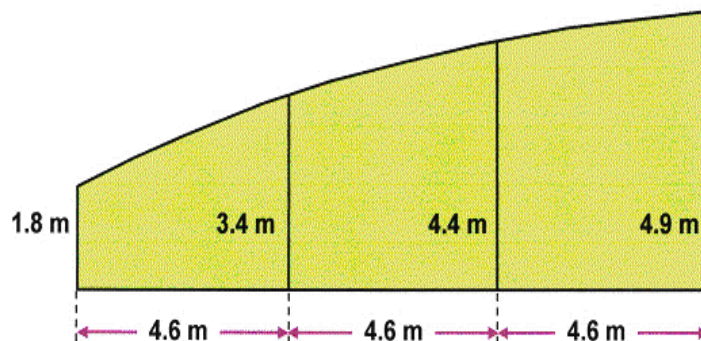
Fig. 6.3 – Figura para aplicação da segunda regra de Simpson.

[Rhodes, Martin (2003)]

Os multiplicadores de Simpson são: 1, 3, 3 e 1.

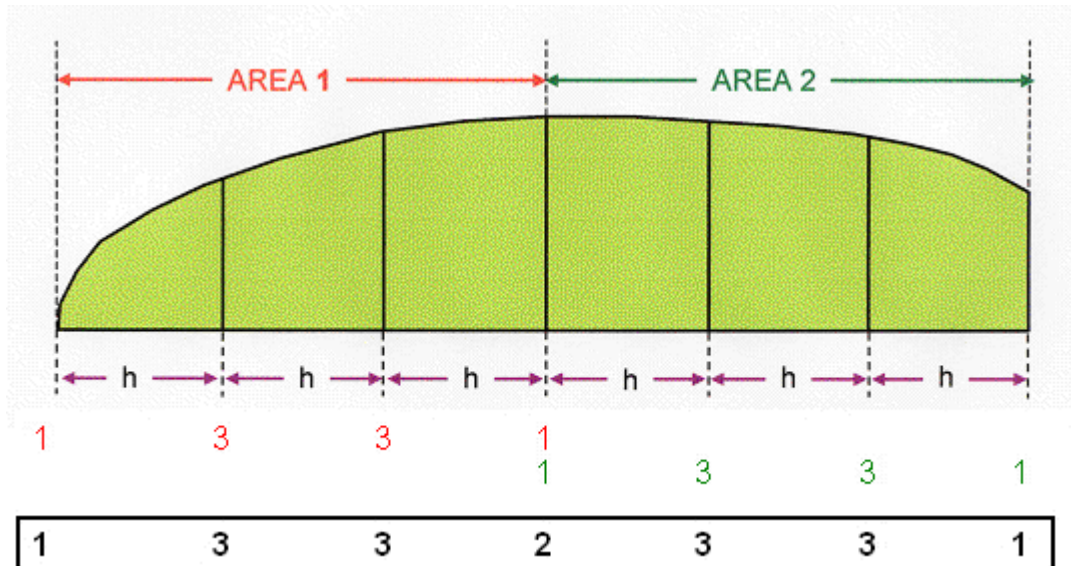
$$\text{AREA} = \frac{3}{8} \times h \times (1A + 3B + 3C + 1D)$$

Exemplo:



$$\begin{aligned}\text{Área} &= \frac{3}{8} \times h \times (1A + 3B + 3C + 1D) \\ \text{Área} &= \frac{3}{8} \times 4.6 \times (1 \times 1.8 + 3 \times 3.4 + 3 \times 4.4 + 1 \times 4.9) \\ \text{Área} &= 51.92 \text{ m}^2\end{aligned}$$

6.1.2.1- Extensão da Segunda regra



Considere-se a metade da área de flutuação:

A área possui sete ordenadas. Os multiplicadores de Simpson, neste caso, são: 1 3 3 2 3 3 1.

Fig. 6.4 – Figura para aplicação da extensão da segunda regra de Simpson.

[Rhodes, Martin (2003)]

As regras de Simpson podem perfeitamente ser utilizadas para calcular a área abaixo da curva de estabilidade.

6.2- Estabilidade dinâmica – a importância da área abaixo da curva de estabilidade

A “estabilidade dinâmica” de um navio a determinado ângulo de adornamento pode ser definida como “o trabalho necessário a uma força exterior (vento, ondulação, etc) para adornar o navio até esse ângulo” [Bhattacharyya, Rameswar (1978)]. Para a estabilidade dinâmica é mais apropriado considerar a utilização da curva dos momentos endireitantes, onde os valores de GZ são calculados para determinados ângulos de adornamento e depois são multiplicados pelo deslocamento do navio:

$$\text{Momento Endireitante (t.m)} = \text{GZ(m)} \times \text{Deslocamento(t)}$$

Por exemplo, considere-se um navio que foi adornado, por forças exteriores, até um ângulo de 25°. Pela observação da figura seguinte, é óbvio que a estabilidade dinâmica é determinada através da área abaixo da curva dos momentos endireitantes, até ao ângulo de adornamento considerado. Assim:

$$\text{Estabilidade Dinâmica} = \text{Area abaixo da curva dos momentos endireitantes}$$

Em que as unidades da estabilidade dinâmica são em t.m.rad.

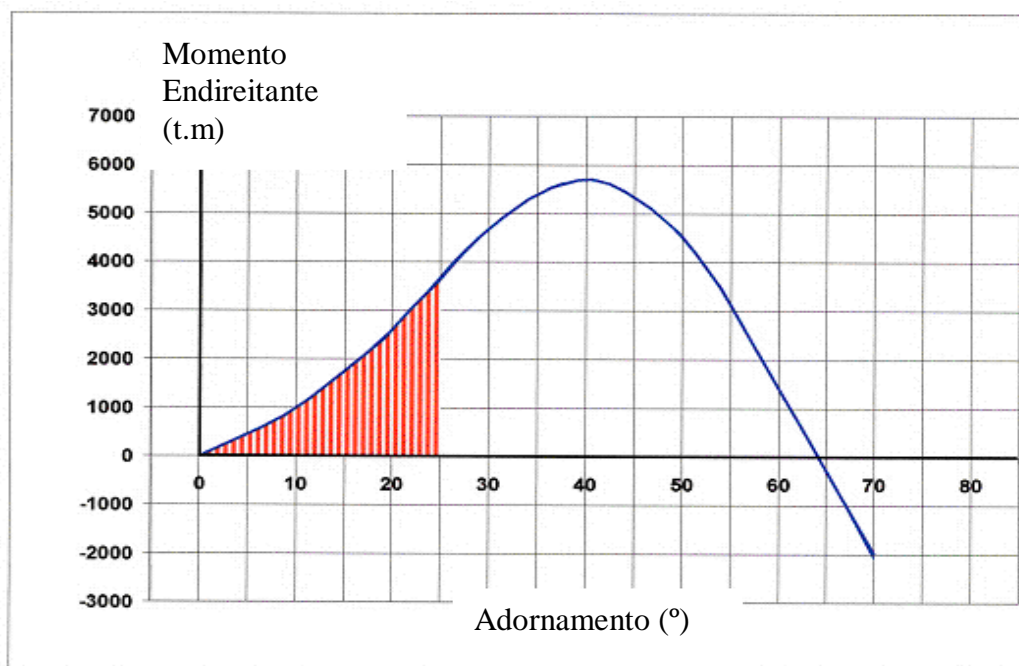


Fig. 6.5 – Estabilidade Dinâmica.

Na prática, é a curva GZ que é traçada, e como:

$$GZ \text{ (m)} = \text{Momento endireitante (t.m)} / \text{Deslocamento (t)}$$

Conclui-se que a estabilidade dinâmica é proporcional à área abaixo da curva GZ, ou seja:

$$\text{Estabilidade Dinâmica (t.m.rad)} = \text{Deslocamento (t)} \times \text{Area abaixo da curva GZ (m.rad)}$$

6.2.1- A diferença entre estabilidade dinâmica e estabilidade transversal inicial

A estabilidade transversal inicial é o termo utilizado para descrever a capacidade do navio retornar à posição de direito, quando dele é desviado pela acção de uma força exterior, e é calculado pela fórmula:

$$\text{Momento Endireitante (t.m)} = \text{GZ (m)} \times \text{Deslocamento (t)}$$

em que o GZ é a medida de quanto os pontos G e B estão afastados horizontalmente, para um determinado ângulo de adornamento.

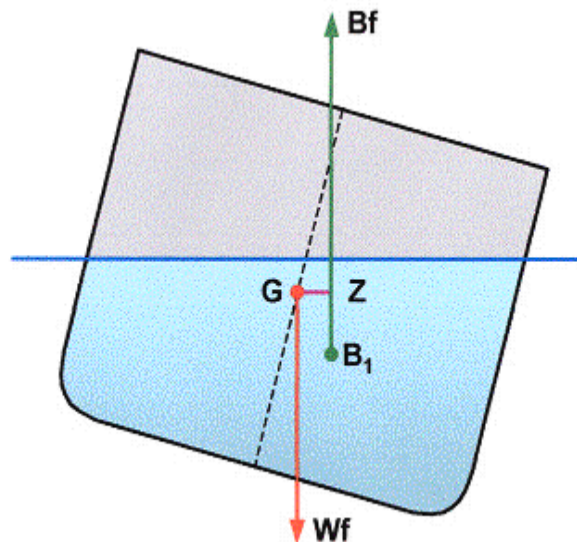


Fig. 6.6 – Peso, Impulsão e braço endireitante.

A estabilidade dinâmica para um certo ângulo de adornamento, corresponde ao trabalho necessário a uma força exterior para adornar o navio até esse ângulo, e é medida pela área abaixo da curva dos momentos endireitantes.

A distinção entre os dois termos é tornada clara pela visualização da seguinte figura:

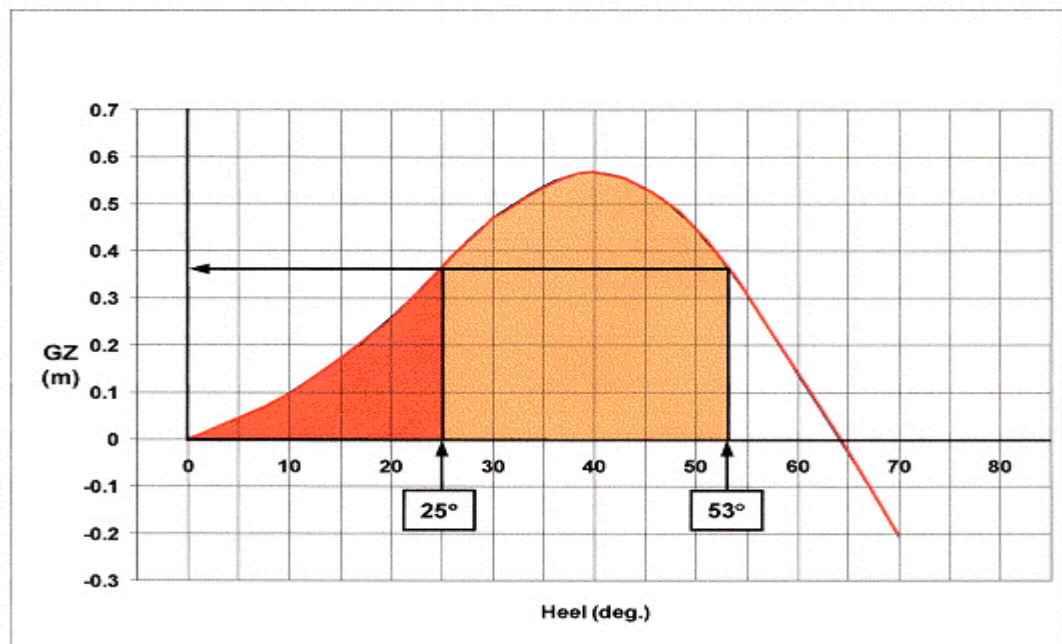


Fig. 6.7 – Exemplo de estabilidade dinâmica para diferentes ângulos de adornamento.
[Rhodes, Martin (2003)]

O momento da estabilidade transversal será o mesmo quando o navio é adornado até aos 25° ou 53°. No entanto, a estabilidade dinâmica será obviamente muito maior a 53° pois mais “trabalho” é necessário para as forças exteriores adornarem o navio a maiores ângulos.

A estabilidade dinâmica traduz o trabalho necessário a ser executado por forças exteriores, e aumenta à medida que aumenta o ângulo de adornamento (o navio resiste ao adornamento), enquanto o navio tiver momentos endireitantes positivos. Para além do ponto AVS (“angle of vanishing stability”), o navio dá a “cambalhota”.

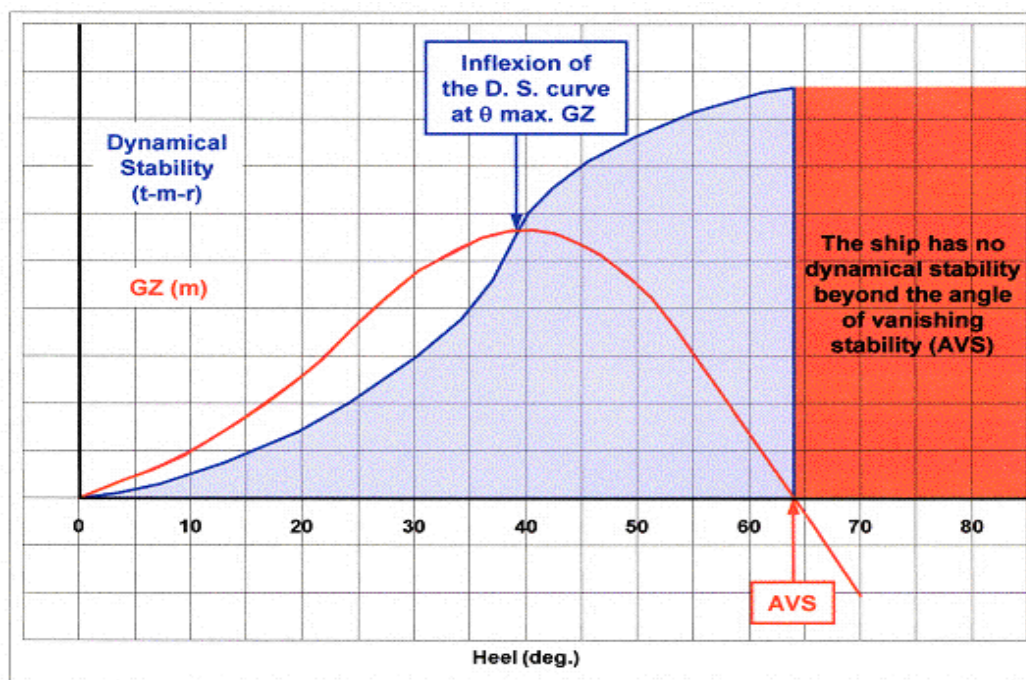


Fig. 6.8 – Curvas de estabilidade estática e dinâmica.
[Rhodes, Martin (2003)]

É de salientar que a explicação anterior só é válida quando o navio é adornado em águas tranquilas, e é assumido que o centro de gravidade mantém-se fixo.

No entanto, na prática, quando o navio adorna no alto mar, sob condições climáticas diferentes, a situação é ligeiramente diferente, como veremos depois.

Existem critérios e normas de segurança para navios de vários tipos no que concerne à estabilidade no mar (normas da *Internacional Maritime organization*).

6.2.2- Relação entre a altura metacêntrica GM e a inclinação inicial da curva de estabilidade transversal

Quando se traça a curva GZ, é usual traçar uma linha vertical a 57.3° (1 radiano) a partir da linha base igual à altura metacêntrica GM efectiva medida na escala vertical do GZ. Isto permite a construção da linha a partir da origem do referencial e indica a tendência inicial da curva GZ, para pequenos ângulos de adornamento.

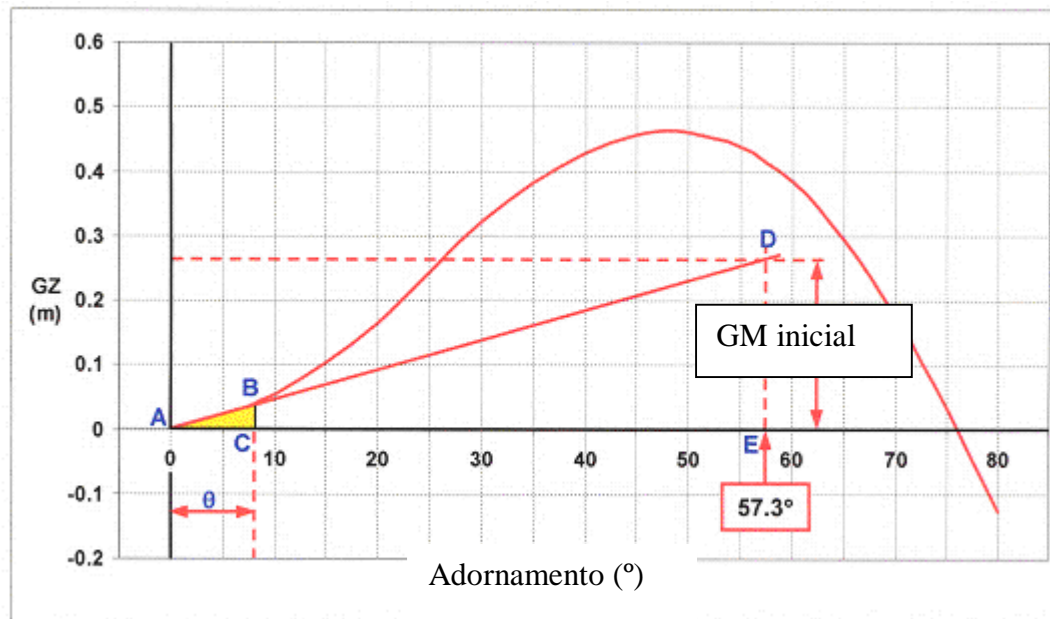


Fig. 6.9 – Altura metacêntrica (GM) inicial e inclinação inicial da curva de estabilidade transversal.
[Rhodes, Martin (2003)]

Pela observação do gráfico anterior temos que:

AD é a linha tangente à curva GZ a partir da origem do referencial (ponto A);

A linha AD corta a linha vertical a 57,3° (1 radiano);

O segmento de recta DE tem um comprimento igual ao GM efectivo do navio e é medida na escala GZ;

O segmento de recta BC corresponde ao valor de GZ perto da origem do referencial para um ângulo pequeno θ ;

Os triângulos ABC e ADE são semelhantes pelo que:

$$\text{GM inicial} \times \theta \text{ (em rad.)} = \text{GZ (a } \theta \text{)}$$

Demonstração:

$$DE / AE = BC / AC$$

$$\text{Ou seja: } DE / 57.3^\circ = GZ (a \theta^\circ) / \theta^\circ$$

E como: $AE = 1$ radiano, e $AC = \theta$ radianos,

$$\text{Temos: } DE / 1 \text{ (rad.)} = GZ (a \theta^\circ) / \theta \text{ (rad.)}$$

Sendo: $DE = GM$ inicial, resulta que:

$$GM \text{ inicial} / 1 \text{ (rad.)} = GZ (a \theta^\circ) / \theta \text{ (rad.)},$$

Para pequenos ângulos, o valor dos ângulos em radianos são muito semelhantes aos valores do seno dos ângulos respectivos:

$$GZ = GM \times \text{Sine} \theta$$

6.2.3- Erros associados à prática da utilização da curva de estabilidade transversal para a determinação da estabilidade de navios no mar

No mar qualquer navio está sujeito a forças exteriores, e consequentemente a momentos inclinantes resultantes. O navio terá assim, activamente, movimentos de balanço transversal, de balanço longitudinal e de arfagem, pelo que é apropriado o estudo dinâmico destes movimentos.

As forças dinâmicas, actuando isoladamente ou em conjunto, podem causar uma perda significativa da estabilidade inicial dos navios, pelo que as limitações à utilização da informação constante na curva de estabilidade estática, podem ser resumidas a:

- Deslocamento leve e KG

Para se obter a validade no cálculo de KG, o valor correcto de KG correspondente ao navio na condição de deslocamento leve, deve ser utilizado. Adiante, comprova-se isto quando se tratar da experiência de inclinação.

No entanto, em serviço, o valor de KG correspondente a navio leve, altera-se com a idade do navio em virtude da substituição de equipamentos de bordo, das

alterações no arranjo interno de compartimentos, corrosão, camadas de pintura, etc.

Sempre que houver alterações estruturais nos navios, deve-se determinar, com exactidão, o novo deslocamento do navio, bem como a nova posição do centro de gravidade KG (através da prova de estabilidade).

- **Erros de cálculo**

A informação fornecida pela curva de estabilidade utilizada só se torna fiável se o navio estiver na mesma condição de carga que aquela assumida pela pessoa que faz os cálculos, tendo em linha de conta os factores que podem deturpar esses cálculos tais como a existência de espelhos líquidos, movimentação inesperada de pesos do interior do navio, utilização das tabelas adequadas para a condição de deslocamento, etc [*Goldberg, Lawrence (1981)*].

- **Efeitos dinâmicos resultantes do movimento do navio no mar**

Este tipo de forças dinâmicas, tais como as ondas e o vento, reduzem a estabilidade inicial dos navios, e em caso extremo podem fazer com que um navio perca por completo a sua reserva de estabilidade, e assim, naufragar.

- **Alterações na estabilidade causadas pelos movimentos de balanço transversal, longitudinal e de arfagem**

Estes movimentos originam alterações na posição e na intensidade da força de impulsão da água do mar sobre o casco do navio, contribuindo assim para alterações na estabilidade.

- **O efeito do vento e da deposição assimétrica de gelo**

O vento, quando não alinhado com o eixo longitudinal do navio, provoca um ângulo permanente de adornamento (para sotavento), e reduz assim a estabilidade inicial do navio, e principalmente, torna-o mais sensível às rajadas de vento, e às ocasionais e excepcionais ondas mais largas.

A deposição do gelo provoca normalmente o aumento da altura do centro de gravidade KG, e consequentemente uma diminuição da reserva de estabilidade

do navio. Quando a deposição de gelo é assimétrica, relativamente à linha de mediania, o navio possuirá também um ângulo de adornamento permanente para um dos bordos, tornando-se assim mais sensível às condições climáticas (possui menor estabilidade).

- **Perda de estabilidade quando o navio se encontra na crista da onda**

A estabilidade de um navio é reduzida quando este se encontra na crista de uma onda, e aumenta na cava da onda. Se o comprimento da onda fôr semelhante ao comprimento do navio, quando a crista da onda estiver a meio-navio, e as cavas adjacentes nos extremos do navio, haverá uma redução da “*water plane area*” em comparação com águas tranquilas. Isto provoca uma redução no BM e consequentemente da altura metacêntrica GM e dos braços endireitantes GZ:

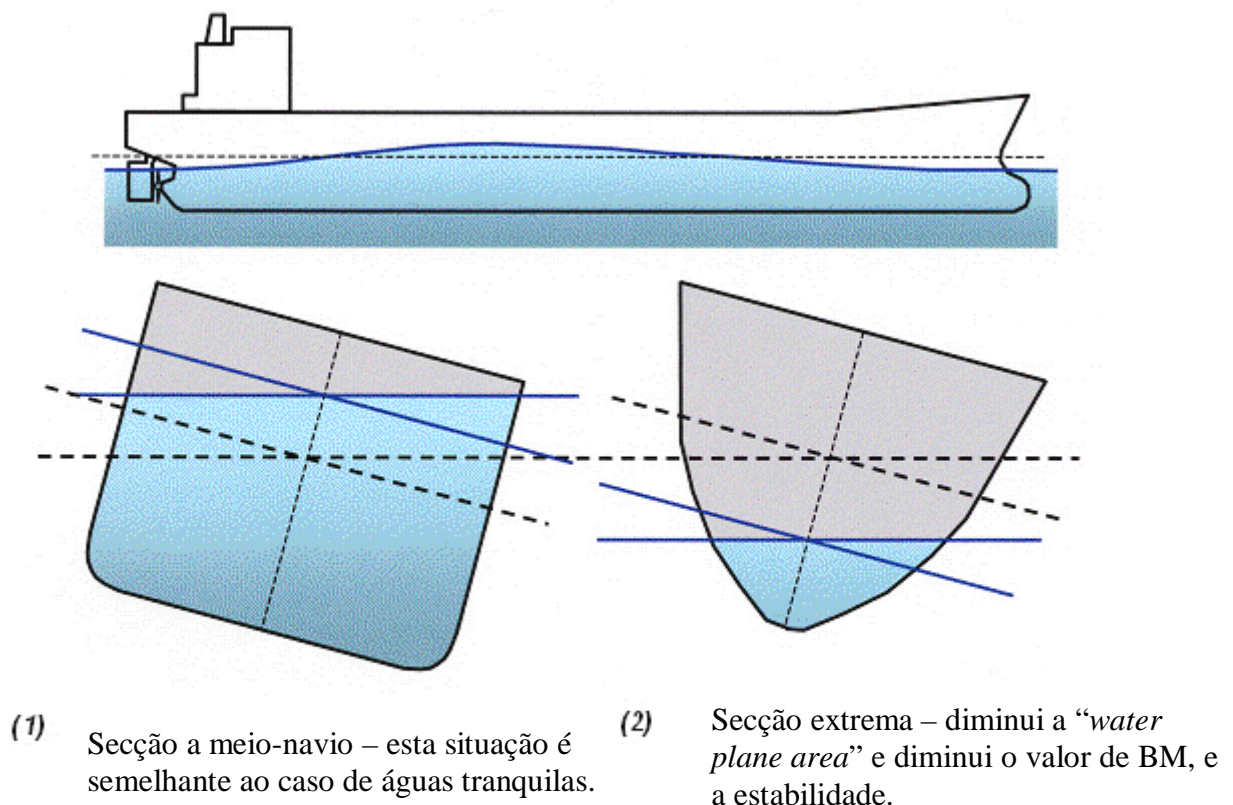


Fig. 6.10 – Alteração da estabilidade quando o navio se encontra na crista da onda.

Na situação contrária, ou seja, a cava da onda a meio-navio e as cristas adjacentes nos extremos do navio, a “*water plane area*” resultante é maior, e consequentemente, a estabilidade [Manning, George (1982)].

- **Ressonância paramétrica**

Manifesta-se no aumento do balanço transversal devido à passagem regular das ondas que causam o aumento da frequência do movimento de cabeceio do navio. Este fenómeno é mais frequente nos navios mercantes de transporte de contentores, que possuem bocas largas e proas fusiformes de modo a poder transportar elevado número de contentores e obter boas velocidades de cruzeiro (o movimento de cabeceio induz o balanço transversal).

- **Movimento dinâmico de água no convés**

O movimento dinâmico de água no convés provoca o aumento do valor de KG, porque o centro de massa da água embarcada encontra-se acima do ponto G, e devido, também, ao efeito dos espelhos líquidos introduzido. O movimento dinâmico da água embarcada no convés, pode por diversas vezes, estar desfasada do movimento de balanço transversal do navio, e pode funcionar de uma maneira semelhante a um tanque estabilizador, ou seja com um efeito positivo. No entanto, se esse movimento estiver em fase com o movimento de balanço transversal do navio, o efeito para a estabilidade será nefasto.

O movimento transversal do centro de gravidade G (que é o efeito verdadeiro causado por um espelho líquido), provoca uma redução dos valores de GZ.

A figura seguinte ilustra o efeito do movimento da água no convés, na estabilidade dos navios.

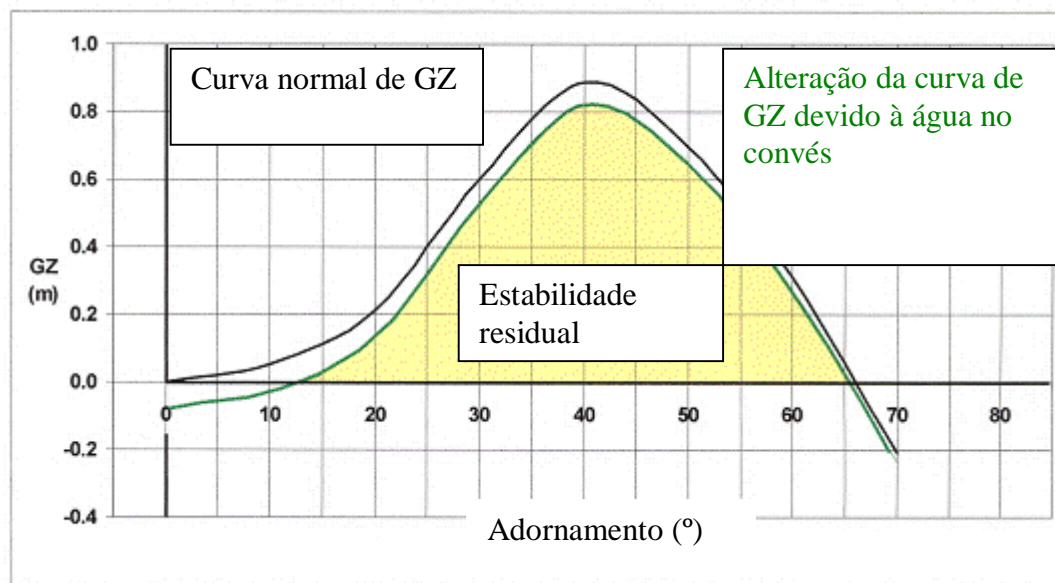


Fig. 6.11 – Efeito do movimento de água no convés na estabilidade transversal.

- **“Broaching” – (o navio tende a atravessar de través à ondulação)**

Este efeito ocorre normalmente devido à aproximação de ondas largas pela área a ré do navio, e fazem com que o navio rode longitudinalmente, empurrado pela crista da onda, como por exemplo é indicado na figura seguinte.

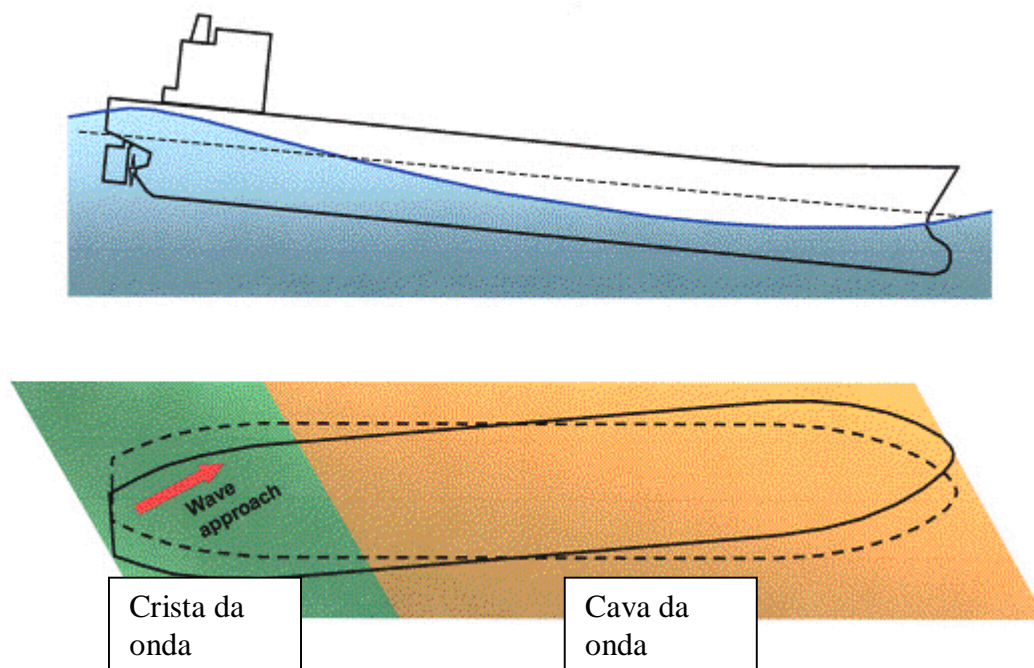


Fig. 6.12 – Movimento de guinada devido à ondulação.

Este movimento causa normalmente fortes movimentos de balanço transversal. A consequência directa é a redução dos braços endireitantes, relativamente ao mesmo adorno em águas tranquilas. A estabilidade transversal dos navios é sempre reduzida em caso de mar alteroso, seja de que direcção relativa estiver a ondulação [Manning, George (1982)].

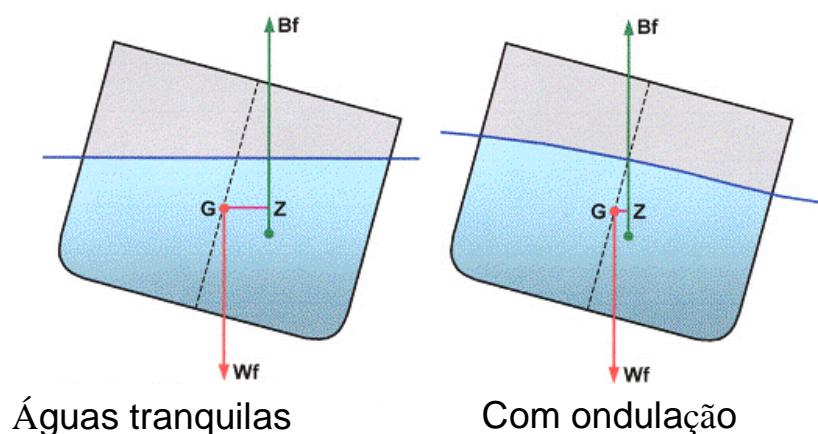


Fig. 6.13 – Comparação de braços endireitantes em águas tranquilas e com ondulação.

- Sincronismo

O sincronismo é outro problema associado às ondas, e acontece quando o período da ondulação é similar ao período natural de balanço transversal do navio, dando origem a balanços transversais excessivos, mesmo em mares relativamente calmos (fenómeno de ressonância).

É nitidamente claro que a determinação da estabilidade de navios deve ser tratada de uma forma dinâmica. Estudos actuais estão a debruçar-se sobre este importante aspecto, de modo a obter uma aproximação realística e dinâmica do comportamento dos navios no mar. A dificuldade reside essencialmente na medição exacta do efeito das forças dinâmicas tais como o vento e a ondulação. No entanto, com a utilização de sensores de movimento, tais como os acelerómetros, já é possível monitorizar os movimentos em todos os planos do

espaço tridimensional e as respectivas acelerações desses movimentos, de modo a obter uma imagem dinâmica do comportamento do navio e as principais características da estabilidade. Estes sistemas de monitorização podem estar interligados a outros sistemas do navio, tais como o sistema de controlo de potência do sistema propulsor, sistemas de estabilidade activa com estabilizadores dinâmicos ou tanques estabilizadores e sistemas de governo (lemes) [Rhodes, Martin (2003)].

7- CURVAS DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL PARA CONDIÇÕES VARIÁVEIS

7.1- Curva de estabilidade transversal para um navio numa condição estável

Um navio encontra-se numa condição de estabilidade estável, ou positiva, se, quando adornado, até pequenos ângulos de inclinação, pela acção de uma força exterior em águas calmas ou tranquilas, retorna à sua posição inicial de direito quando deixa de actuar a força perturbadora.

Na condição de adornado GZ é positivo, e actuará de modo a repôr o navio na posição inicial, quando a força exterior é removida e como $KM - KG = GM$, o valor de GM é positivo.

Uma curva típica deste tipo de condição (estabilidade positiva) é mostrada na seguinte figura.

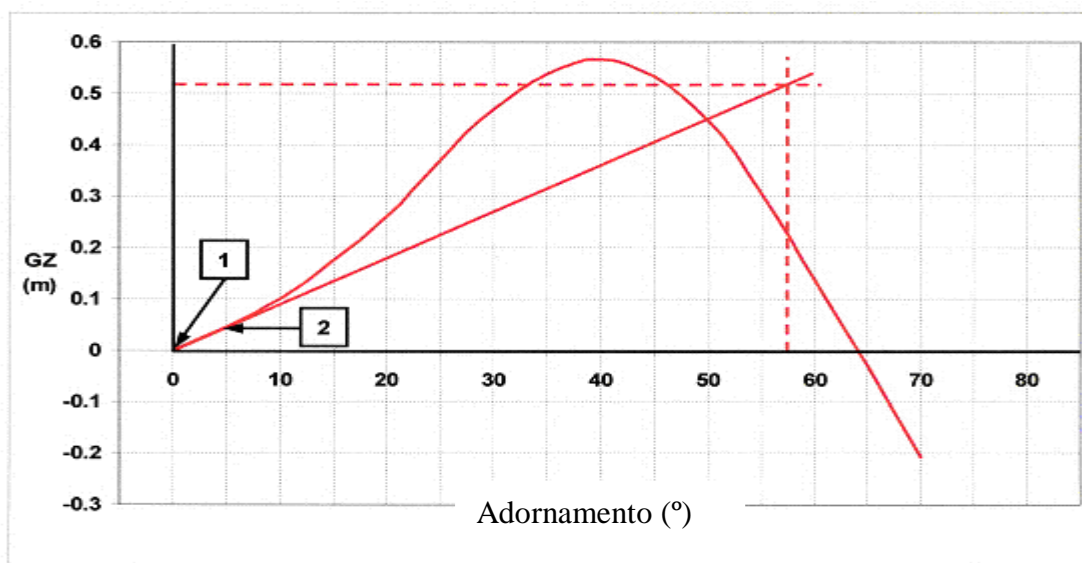


Fig. 7.1 – Curva de estabilidade positiva.
[Rhodes, Martin (2003)]

À medida que o navio é adornado para além de pequenos ângulos, os valores de GZ distanciam-se dos valores tirados a partir da linha tangencial (linha 2 – baseada no GM inicial).

7.2- Curva de estabilidade transversal para um navio em condição neutra

Um navio possui estabilidade transversal neutra se, quando adornado por uma força exterior em águas tranquilas até pequenos ângulos de adornamento, ficar com uma inclinação indeterminada. Neste caso: $KM - KG = 0$; $GM = 0$.

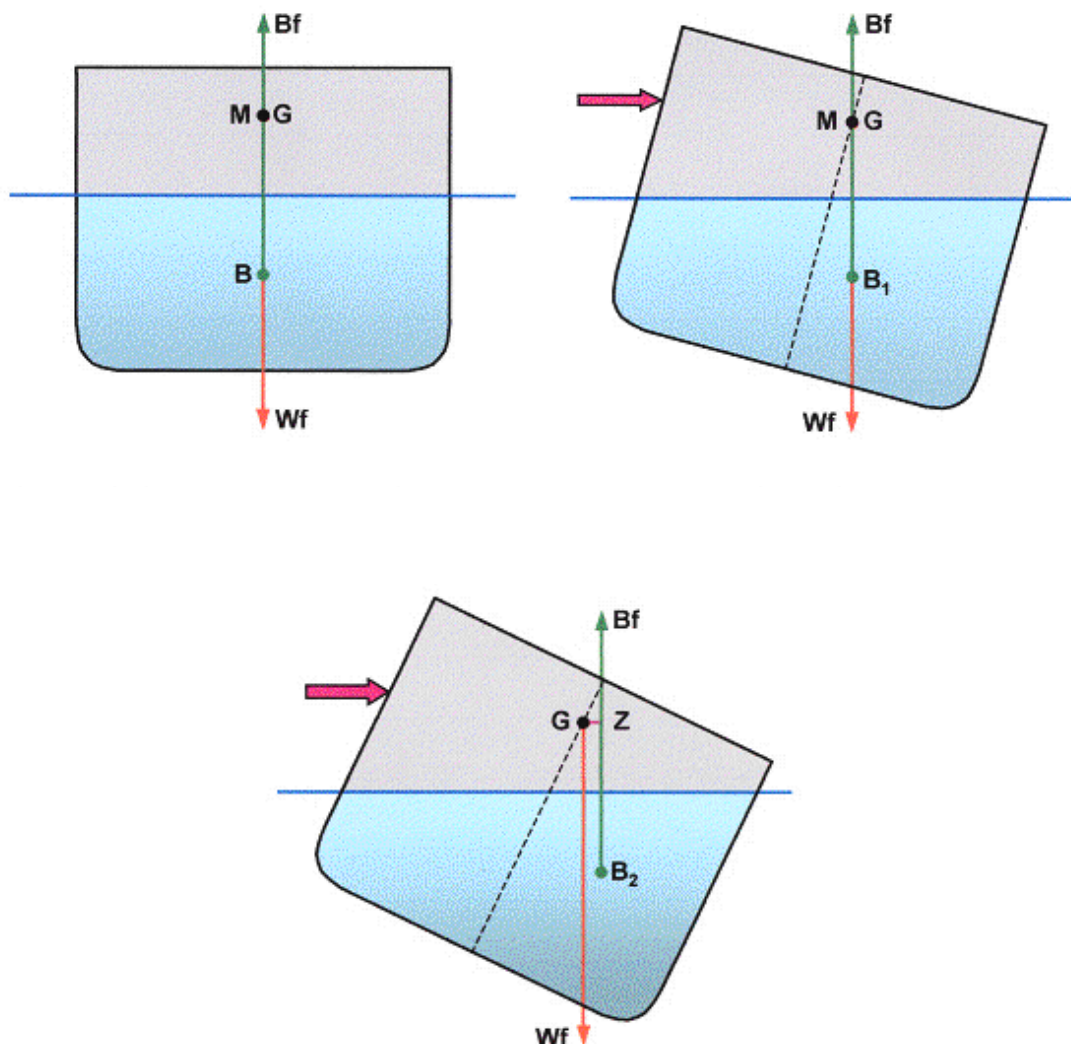


Fig. 7.2 – Adornamento de um navio com estabilidade neutra.
[Rhodes, Martin (2003)]

A curva de estabilidade transversal para este tipo de condição é mostrada seguidamente:

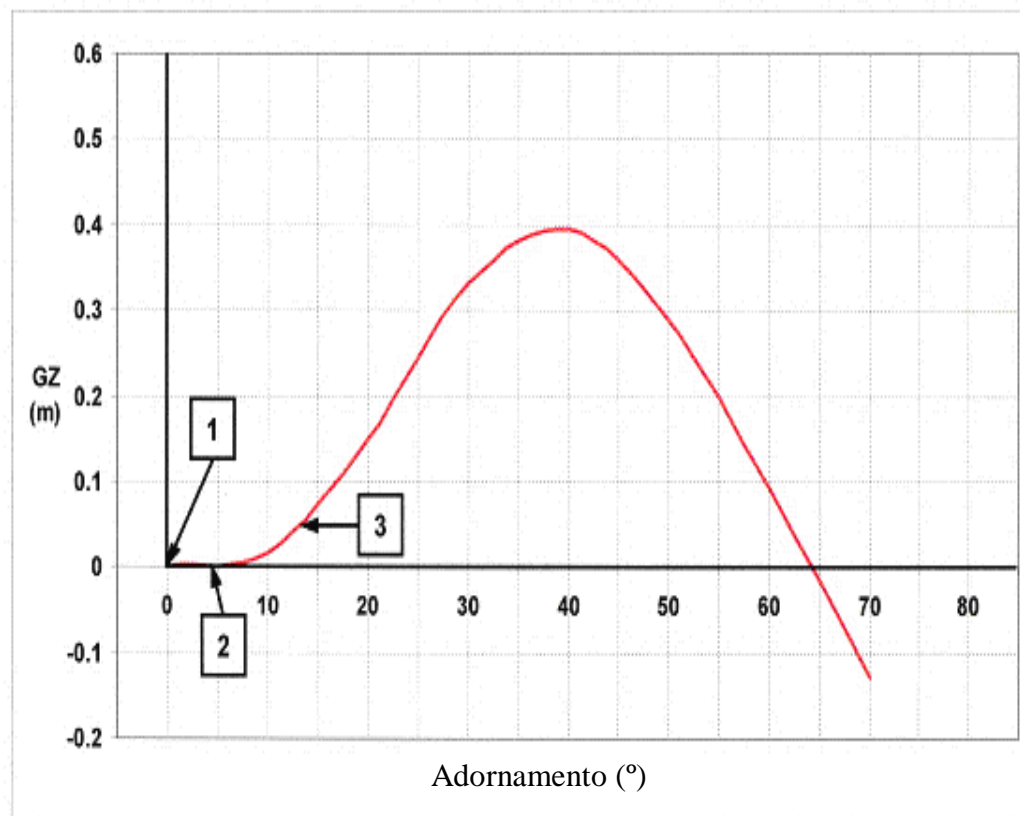


Fig. 7.3 – Curva de estabilidade neutra.
[Rhodes, Martin (2003)]

7.3- Curva de estabilidade transversal para um navio em condição instável (*angle of loll* – ângulo de banda)

Um navio encontra-se na condição de estabilidade transversal inicial negativa se, quando adornado até pequenos ângulos e por acção de uma força exterior, continua a adornar no mesmo sentido, mesmo quando a força exterior é removida. Neste caso o metacentro M está por baixo do centro de gravidade G, e como $KM - KG = GM$, o valor de GM é negativo.

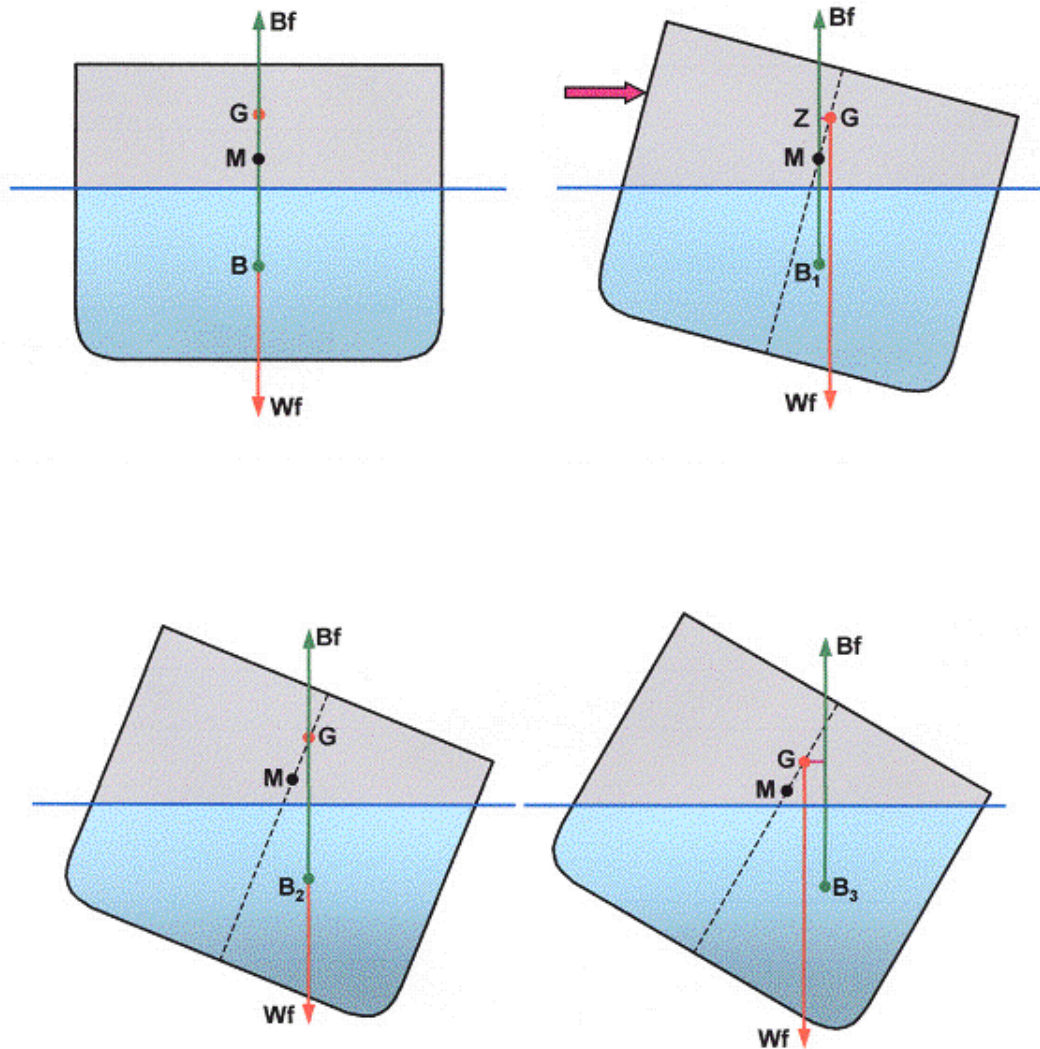


Fig. 7.4 – Adornamento de um navio em condição instável.

[Rhodes, Martin (2003)]

A curva de estabilidade transversal inicial para este tipo de condição é a seguinte:

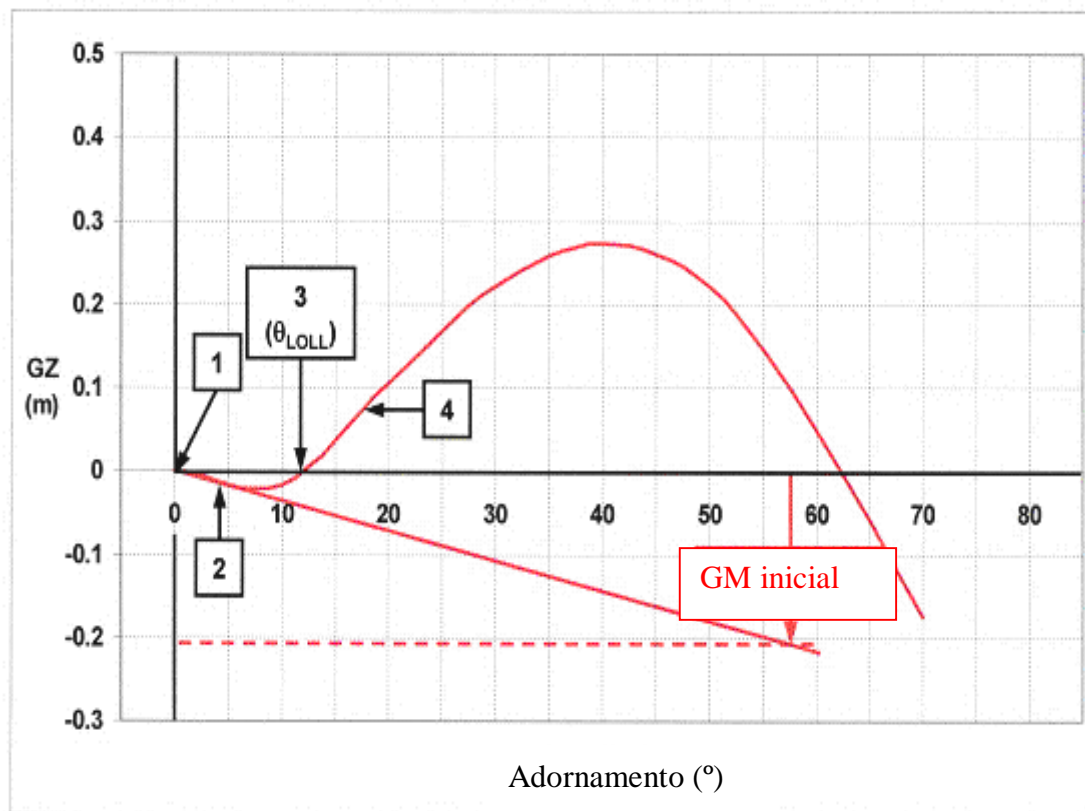


Fig. 7.5 – Curva de estabilidade em condição instável.
[Rhodes, Martin (2003)]

7.4- Curva de estabilidade transversal inicial, quando o centro de gravidade não se encontra sobre a mediania do navio

Durante a estiva de um navio, ou se houver deslocamento de pesos consideráveis no seu interior, o centro de gravidade G pode-se deslocar para bombordo ou estibordo, de uma distância GG_H , e desviar-se assim da linha de mediania. A seguinte figura ilustra o que sucede quando o navio é adornado por acção de uma força exterior, considerando uma altura metacentrica GM positiva (M acima de G):

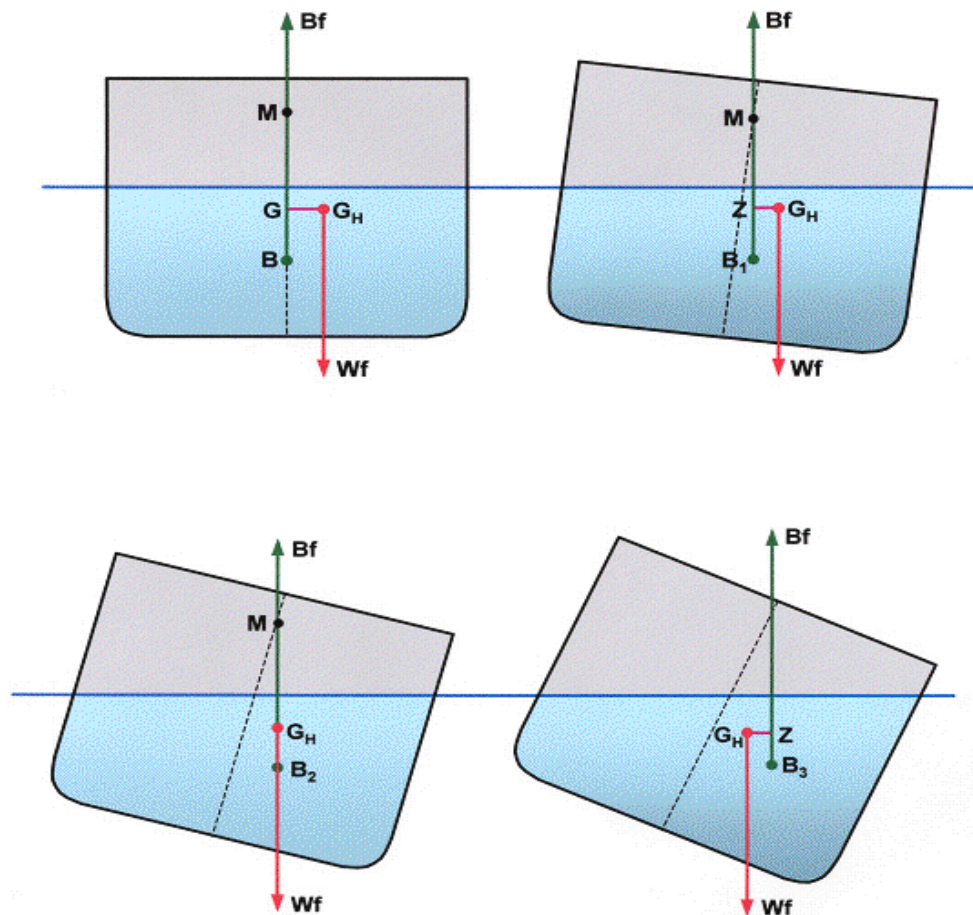


Fig. 7.6 – Adornamento de um navio quando o centro de gravidade não se encontra sobre a mediania do navio.
[Rhodes, Martin (2003)]

Uma curva típica deste tipo de situação é seguidamente ilustrada:

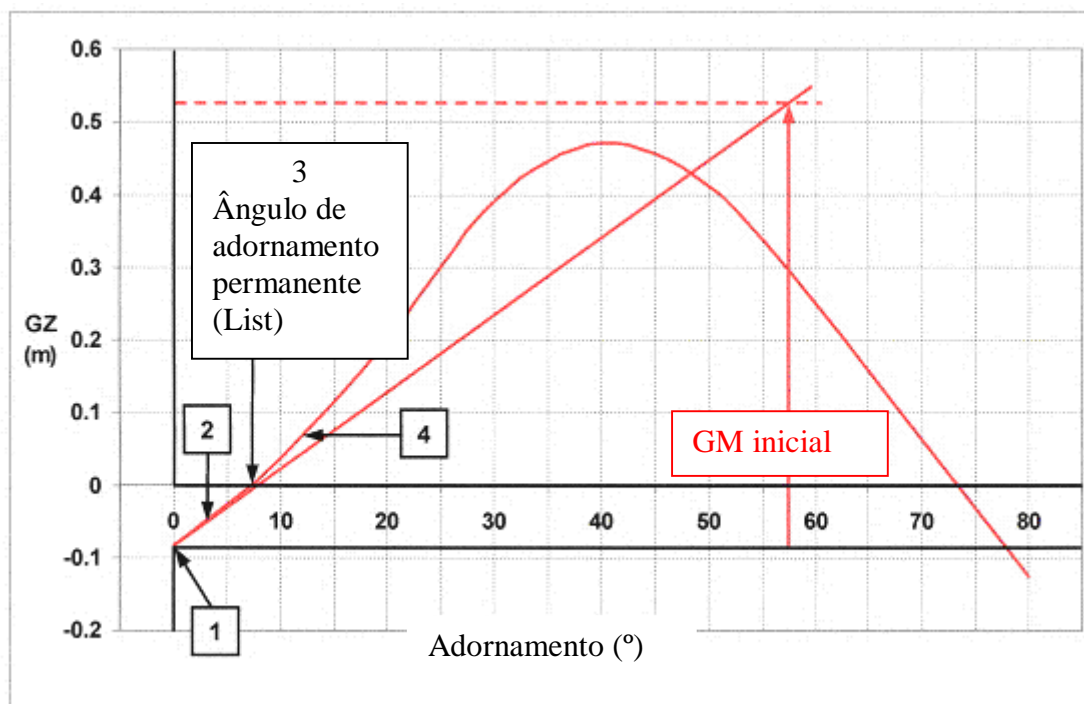


Fig. 7.7 – Curva de estabilidade quando o centro de gravidade não se encontra sobre a mediania do navio.
[Rhodes, Martin (2003)]

7.5- Procedimentos para evitar a ocorrência de ângulos de adornamento permanentes (*angle of loll and list*)

Durante uma navegação, a estabilidade do navio pode e deve ser permanentemente acautelada. É recomendável que o cálculo da altura metacêntrica GM e da curva GZ resultante possam ser previstas para a pior condição.

Factores tais como o transporte de carga a granel, susceptível de absorver a humidade do ar (o ponto G sobe), o embarque de água no convés devido às condições adversas de mar, a deposição de gelo nas superestruturas, o consumo de combustível e de água durante o trajeto e consequente criação de espelhos ou superfícies livres nos tanques, o rumo do navio relativamente à ondulação marítima e/ou ao vento (que podem provocar ângulos de adornamento permanentes, e consequente diminuição da estabilidade dinâmica), a movimentação inadvertida de pesos significativos a bordo; são alguns dos aspectos a ter em conta para a estabilidade e segurança do navio, e das pessoas a bordo.

8- FÓRMULA COMPLETA DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL

8.1- Distinção entre estabilidade transversal a pequenos e grandes ângulos de adornamento

8.1.1- Estabilidade para pequenos ângulos de adornamento (estabilidade transversal inicial)

A figura seguinte mostra um navio adornado com pequeno ângulo por acção de uma força exterior. O centro de impulsão moveu-se de B para B_1 , com uma direcção paralela e no mesmo sentido da mudança da cunha de liquido (bb_1).

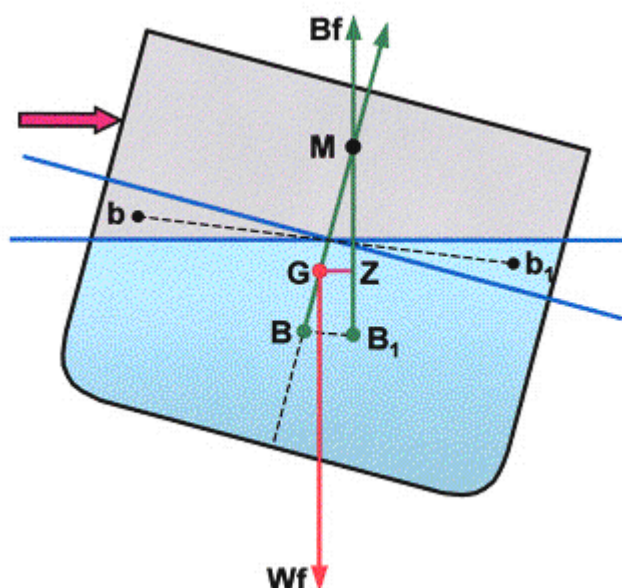


Fig. 8.1 – Alteração do centro de aplicação da impulsão (B) com o adornamento (pequeno ângulo).
[Rhodes, Martin (2003)]

A linha de acção da impulsão que actua a partir de B_1 passa através do metacentro transversal inicial M. Para pequenos ângulos de adornamento (até cerca de 10°) é assumido que o movimento do ponto B segue um arco de círculo com raio igual à distância BM (raio metacêntrico).

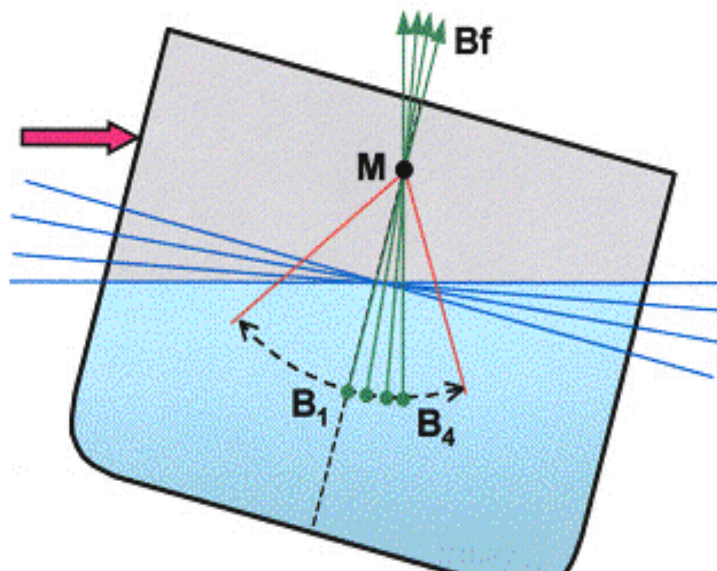


Fig. 8.2 – Raio Metacêntrico (BM).
[Rhodes, Martin (2003)]

O raio metacentrico BM é dado por: $BM = I / V$, em que I é o momento de inércia ou de 2ª ordem da área de flutuação do navio. Por exemplo para um casco com forma prismática regular temos que: $BM = L.B^3 / (12.V)$, em que L e B são respectivamente o comprimento e a largura do navio na área de flutuação e V o volume de liquido deslocado correspondente ao deslocamento do navio ($V = L.B.d$).

Para pequenos ângulos de adornamento o valor do raio metacentrico BM pode ser considerado constante, desde que não haja aumentos significativos ou alteração de forma da área de flutuação à medida que o navio adorna, ou seja desde que o valor de I se mantenha constante. Assim, o valor do braço endireitante é calculado através de:

$$GZ = GM \times \sin \theta$$

e o momento endireitante ou momento de estabilidade transversal por:

$$\text{MOMENTO ENDIREITANTE} = (GM \times \sin \theta) \times \text{DESLOCAMENTO}$$

Estas medidas de estabilidade são conhecidas como estabilidade transversal inicial porque estão relacionadas com a posição do metacentro transversal inicial, que é assumido que mantém uma posição fixa para ângulos pequenos de adornamento.

8.1.2- Estabilidade para grandes ângulos de adornamento

A figura seguinte mostra um navio adornado com um grande ângulo. Quando um navio sofre adornamentos com grandes ângulos, o centro de aplicação da impulsão B, não se movimenta ao longo do arco de um círculo. A transferência da cunha de liquido do bordo alto para o bordo baixo é tal que também provoca o deslocamento vertical do ponto B.

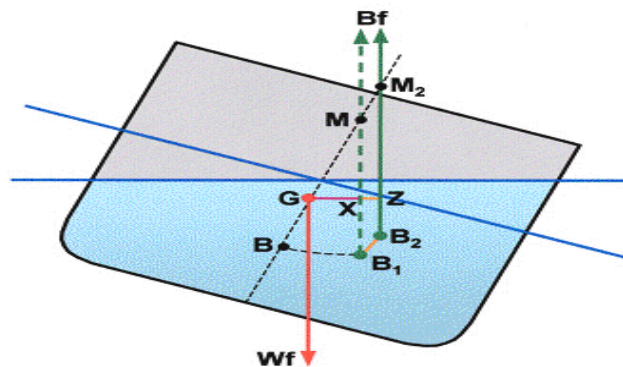


Fig. 8.3 – Alteração do centro de aplicação da impulsão (B) com o adornamento (grande ângulo).
[Rhodes, Martin (2003)]

O ponto B desloca-se para o ponto B_2 em vez do ponto B_1 que corresponderia a ângulos pequenos de adorno (deslocação sob o arco de círculo).

A área de flutuação para grandes ângulos de adorno é também maior, e consequentemente a distância BM aumenta como resultado do grande valor do momento de inércia da área de flutuação. Isto faz com que o Metacentro M se desloque para M_2 .

O braço endireitante é dado por: $\mathbf{GZ} = \mathbf{GX} + \mathbf{XZ}$, que é maior que o braço endireitante para ângulos pequenos. Esta fórmula pode ser melhor desenvolvida, ou seja:

$$GZ = (GM \times \text{Sine } \theta) + (\frac{1}{2}BM \times \text{Tan}^2\theta \times \text{Sine } \theta)$$

i.e. $GZ = GX + XZ$

e simplificando:

$$GZ = (GM + \frac{1}{2}BM \tan^2 \theta) \sin \theta$$

Onde GM e BM correspondem aos valores para o navio na posição de direito.

Uma outra definição para ângulos pequenos de adornamento corresponde à afirmação de que XZ é pequeno (ou negligenciável) quando comparado com o valor de GX ($GX = GM \times \sin \theta$ para ângulos pequenos). No entanto ao se usar a fórmula do braço endireitante GZ para navios com grande altura metacentrica inicial GM , e para maiores ângulos de adornamento, o erro de cálculo mantém-se pequeno (o mesmo já não acontece se o GM for pequeno).

8.2- Ângulo de adornamento permanente ou ângulo de banda (*angle of loll*)

Um navio com altura metacentrica GM negativa não se mantém na posição de direito. Ele adornará, para bombordo ou estibordo, até o centro de impulsão alinhar, na mesma direção, com o centro de gravidade, como se pode observar pela seguinte figura:

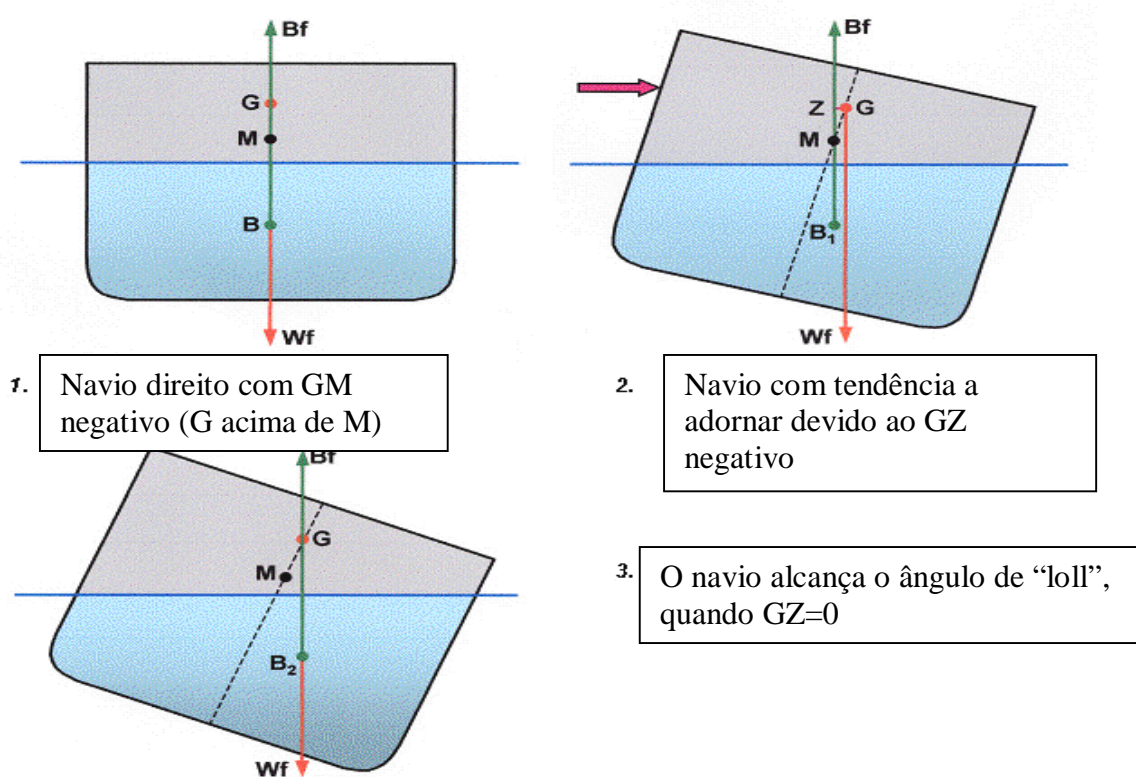


Fig. 8.4 – Navio adornado com altura metacêntrica negativa, e até ao ângulo de adornamento permanente.
[Rhodes, Martin (2003)]

No ângulo de adorno permanente o braço endireitante $GZ=0$. A fórmula para calcular os valores de GZ é:

$$GZ = (GM \times \text{Sine } \theta) + (\frac{1}{2}BM \times \text{Tan}^2\theta \times \text{Sine } \theta)$$

No ângulo de adorno permanente $GZ=0$,
logo:

$$\therefore 0 = (GM \times \text{Sine } \theta) + (\frac{1}{2}BM \times \text{Tan}^2\theta \times \text{Sine } \theta)$$

$$\therefore - (GM \times \text{Sine } \theta) = (\frac{1}{2}BM \times \text{Tan}^2\theta \times \text{Sine } \theta)$$

Dividindo ambos os termos por $\text{sine } \theta$ temos:

$$- GM = \frac{1}{2}BM \times \text{Tan}^2\theta, \quad \text{ou} \quad GM = \frac{BM \times \text{Tan}^2\theta}{2}$$

$$\therefore \frac{-2 \times GM}{BM} = \text{Tan}^2\theta$$

$$\therefore \boxed{\text{Tan } \theta_{\text{OLL}} = \sqrt{\frac{-2 \times GM}{BM}}}$$

Nesta equação os valores de GM e de BM são os correspondentes aos valores da posição de direito. O valor de GM é negativo, pelo que o valor da raiz quadrada torna-se positivo.

Se o navio fôr inclinado para além do ângulo de inclinação permanente, os momentos endireitantes tornam-se positivos, e reagem de modo a trazer o navio para a posição correspondente ao ângulo de adorno permanente.

$$\boxed{GZ = (GM + \frac{1}{2}BM \text{Tan}^2 \theta) \text{Sine } \theta}$$

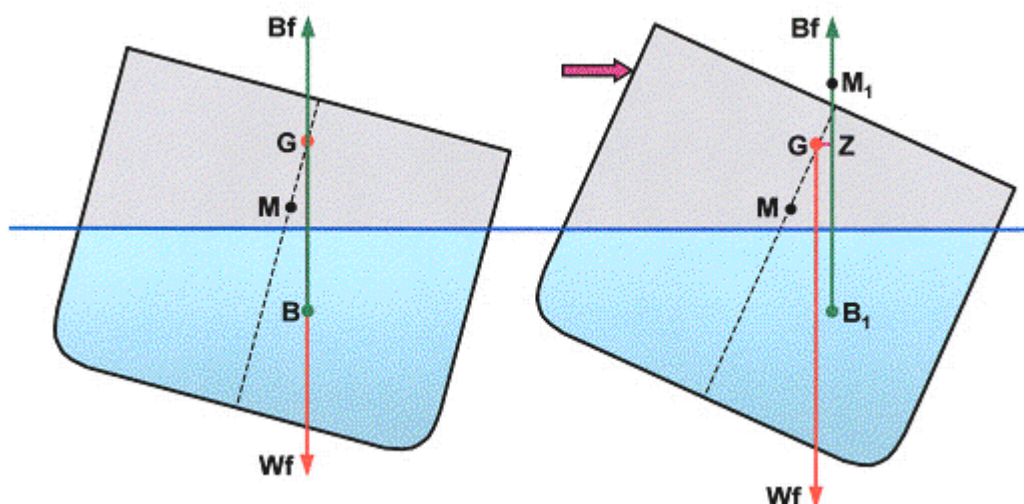


Fig. 8.5 – Navio adornado com altura metacêntrica negativa, para além do ângulo de adornamento permanente.

Durante o adornamento, para além do adornamento permanente, o metacentro M adquire uma nova posição acima do M inicial, ou seja, adquire a posição do ponto M_1 , e a altura metacêntrica passa a ser GM_1 (altura metacêntrica para o ângulo de adornamento permanente), e é dada por:

$$\text{GM at the angle of loll} = \frac{-2GM}{\cos \theta}$$

Onde GM , no 2º termo da equação, é o valor inicial de GM na posição de direito, e é um valor negativo e θ é o ângulo de adornamento permanente. É de realçar que o metacentro M_1 não necessita de estar sobre a linha de mediania do navio, e que se move constantemente à medida que o navio é adornado para além do ângulo de adornamento permanente [Goldberg, Lawrence (1981)].

8.3- Cálculo do ângulo de “list” causado por movimento transversal de peso quando o $GM = 0$

Considere-se um navio na posição de direito e na condição de estabilidade neutra, em que $GM=0$, com um peso w no convés. Se o peso for deslocado transversalmente ao longo do convés, o ponto G mover-se-á para a posição G_H . O navio adornará e

oscilará até se manter em repouso, quando a linha de acção da impulsão coincidir com a linha de acção do deslocamento do navio.

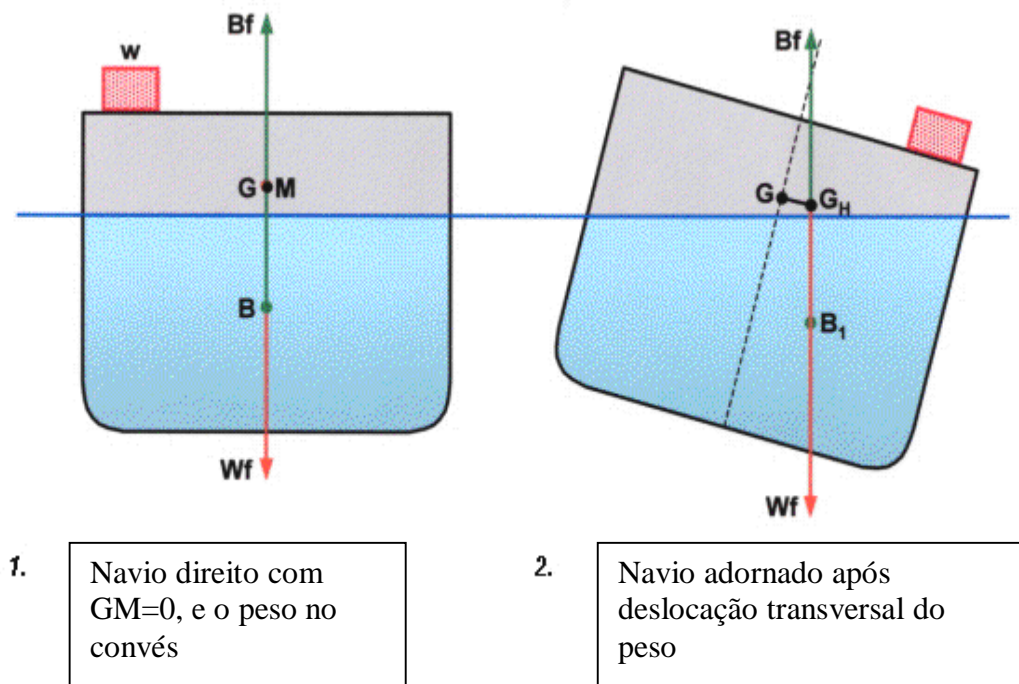


Fig. 8.6 – Navio adornado com altura metacêntrica nula, através de embarque de pesos.
[Rhodes, Martin (2003)]

Na posição de adornamento permanente a componente horizontal de GG_H é representado por GX , que corresponde ao braço endireitante do momento causado por uma força exterior que provoca o mesmo ângulo de adornamento que o deslocamento transversal do peso anteriormente referido.

$$GG_H = \frac{w \times d}{W} \quad (1)$$

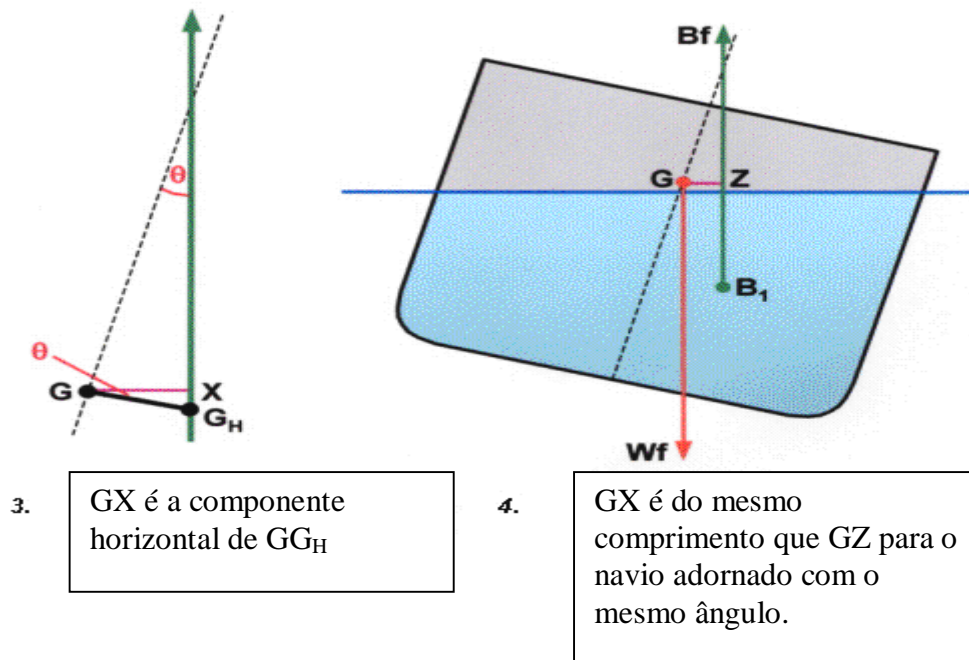


Fig. 8.7 – Análise do triângulo GZM.com o navio adornado, com altura metacêntrica inicial nula, e com deslocamento transversal de pesos.

Pela análise do triângulo rectângulo GG_HX, pode-se concluir que:

Do triângulo GG_HX: $\text{Cosine } \theta = \frac{\text{ADJ}}{\text{HYP}} \quad \therefore \quad \text{Cosine } \theta = \frac{GX}{GG_H}$

$$\therefore \quad \boxed{GX = \text{Cos } \theta \times GG_H} \quad (2)$$

Combinando as fórmulas (1) e (2) obtém-se:

$$\boxed{GX = \frac{\text{Cos } \theta \times w \times d}{W}}$$

e como:

$$GX = (GM + \frac{1}{2}BM \text{ Tan}^2 \theta) \text{ Sine } \theta$$

$$\therefore \quad \frac{\text{Cos } \theta \times w \times d}{W} = (GM + \frac{1}{2}BM \text{ Tan}^2 \theta) \text{ Sine } \theta$$

Sendo GM=0:

$$\frac{\text{Cos } \theta \times w \times d}{W} = \frac{1}{2}BM \text{ Tan}^2 \theta \times \text{Sine } \theta$$

E dividindo ambos os termos por Cos θ , temos:

$$\frac{w \times d}{W} = \frac{1}{2} BM \tan^3 \theta$$

(Porque: $\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta}$)

$$\frac{w \times d}{W} = \frac{BM \tan^3 \theta}{2}$$

Rearranjando, obtemos: $\frac{2 \times w \times d}{BM \times W} = \tan^3 \theta$

E assim:

$$\tan \theta_{\text{LIST WHEN GM} = 0} = \sqrt[3]{\frac{2 \times w \times d}{BM \times W}}$$

9- FACTORES QUE INFLUENCIAM A FORMA DA CURVA DE ESTABILIDADE TRANSVERSAL

A forma e a área abaixo da curva de estabilidade transversal é influenciada pela maneira como um navio é carregado, pelo que é essencial o conhecimento e influência de alguns factores. Os factores são: alteração da altura do centro de gravidade KG, deslocamento transversal de pesos (*list*), alteração da altura de bordo livre ou altura das obras mortas, boca (largura) do navio e caímento longitudinal do navio [D'Oliveira, Rogério (2001)].

9.1- Efeito da alteração de KG

A altura do centro de gravidade KG de um navio pode alterar como resultado de:

- Adição, descarga e mudança de carga geral;
- Adição, descarga e transferência de lastro, combustível e óleo lubrificante;
- Aumento de KG devido à suspensão de pesos durante as operações com gruas do navio;
- Alterações durante as navegações tais como: consumo de combustível, água e géneros, introdução de espelhos líquidos devido ao consumo de líquidos em tanques, acumulação de gelo no convés e superestruturas do navio, acumulação de água do mar (ou de rios) no convés devido a más condições climáticas,

introdução de água no interior do navio durante situações de acidente marítimo (como por exemplo durante colisões entre navios, ou abertura de fissuras no casco em caso de colisão com rochas, etc).

Os efeitos anteriores podem ser quantificados em termos de redução ou aumento do valor do braço endireitante GZ .

Considere-se um navio adornado pelo efeito de uma força exterior até determinado ângulo (pequeno ou grande):

Se o ponto G subir (aumento de KG), o braço endireitante GZ diminuirá e o navio torna-se menos estável.

Se o ponto G descer (diminuição de KG), o braço endireitante GZ aumentará e o navio torna-se mais estável.

O aumento ou a diminuição de GZ , para determinado ângulo de adornamento, pode ser facilmente calculado.

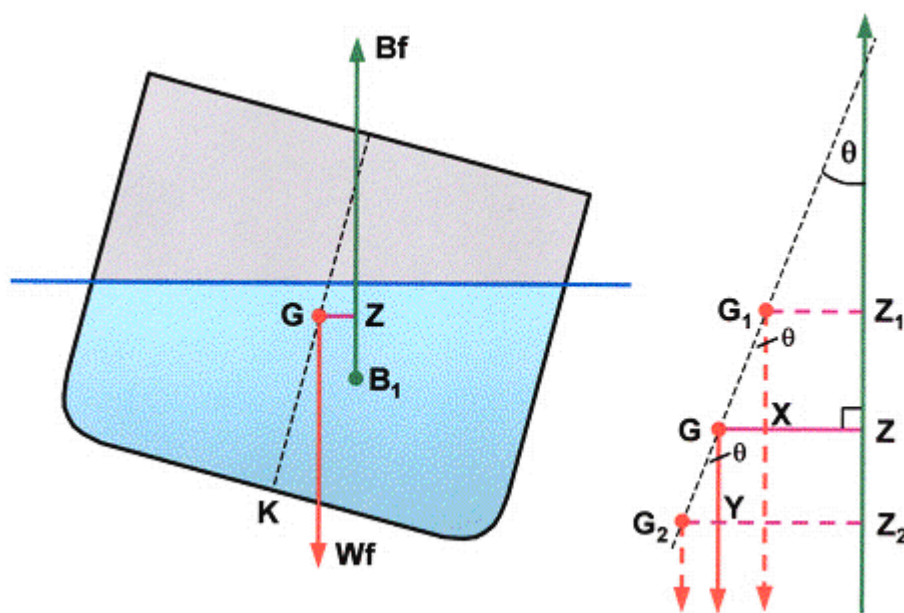


Fig. 9.1 – Efeito da alteração de KG .
[Rhodes, Martin (2003)]

Se G subir até G_1 para o mesmo ângulo de adornamento, temos que:

(GX = à perda do braço endireitante)

Do triângulo: GG_1X : $\text{Sine } \theta = \frac{\text{OPP}}{\text{HYP}} = \frac{GX}{GG_1}$

$$\therefore \quad \mathbf{GX = GG_1 \times \text{Sine } \theta}$$

Se o ponto G baixar para G2, para o mesmo ângulo, o valor de G_2Y = aumento do braço endireitante.

Do triângulo: GG_2Y : $\text{Sine } \theta = \frac{\text{OPP}}{\text{HYP}} = \frac{G_2Y}{GG_2}$

$$\therefore \quad \mathbf{G_2Y = GG_2 \times \text{Sine } \theta}$$

Se KG alterar, o efeito no valor de GZ para qualquer ângulo de adorno pode ser determinado por:

$$\mathbf{Alteração \ de \ GZ = GG_v \times \text{Sen } \theta}$$

Considerando, por exemplo, que um determinado navio tem estabilidade positiva até aos 90° e o KG aumenta devido ao levantamento de um peso no interior do navio, a perda de GZ é dada por:

$$\mathbf{Perda \ de \ GZ = GG_v \times \text{Sen } \theta}$$

Como $\text{Sen } 0^\circ = 0$ e $\text{sen } 90^\circ = 1$, conclui-se que:

A perda de GZ aumenta com o aumento do ângulo de adorno.

O efeito na curva de estabilidade é a seguinte:

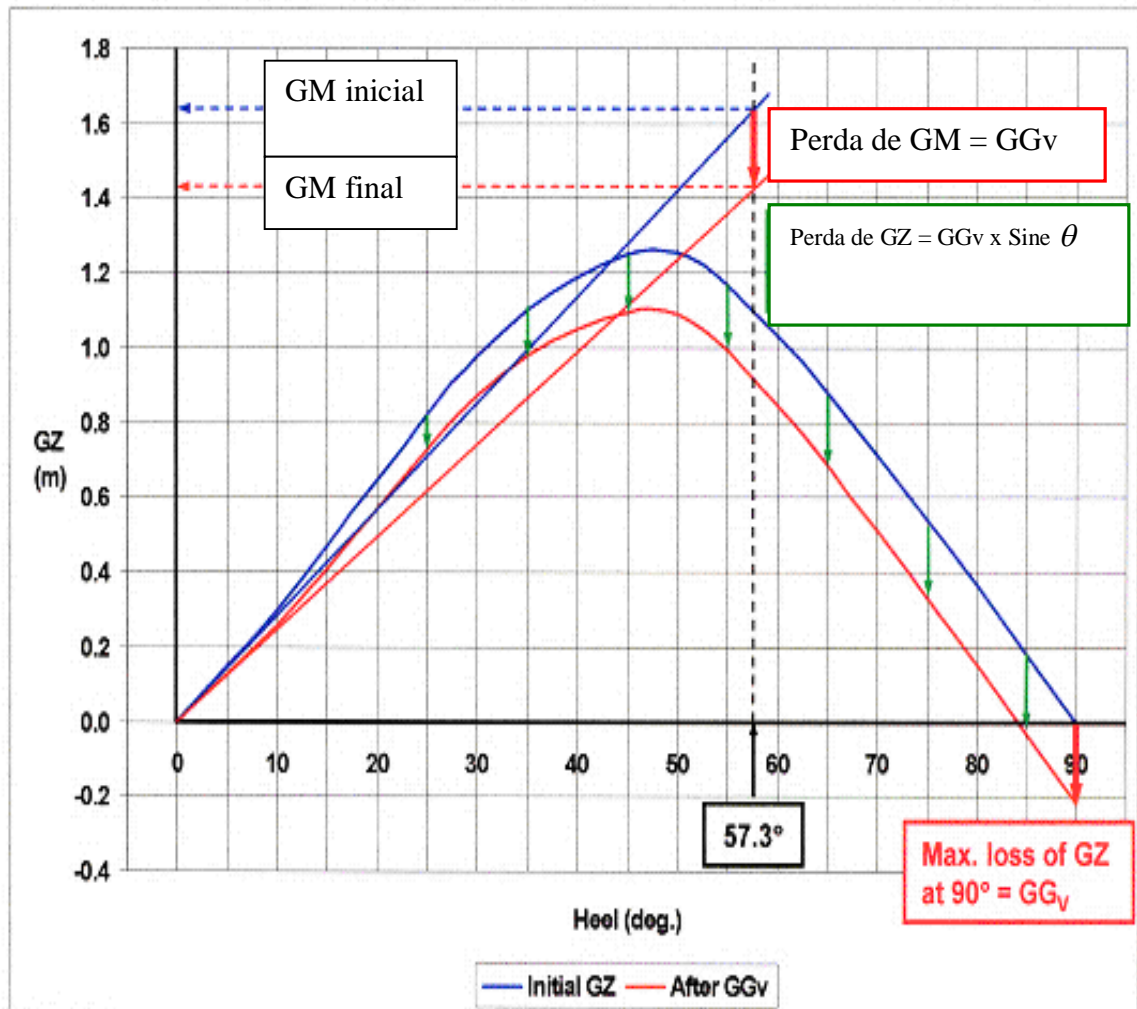


Fig. 9.2 – Efeitos na curva de estabilidade devido a alteração de KG.
[Rhodes, Martin (2003)]

Verifica-se, assim, que o aumento de KG provoca:

- A altura metacêntrica inicial GM diminui de um valor igual a GG_v ;
- Todos os valores de GZ dentro da gama de estabilidade positiva são diminuídos, particularmente para ângulos maiores de adornamento;

- c) A estabilidade dinâmica (área abaixo da curva) diminui fazendo com que o navio se torne menos capaz de resistir ao adornamento provocado por forças exteriores;
- d) A gama de estabilidade positiva é diminuída;
- e) O ângulo correspondente à imersão do convés (ponto de inflexão da curva) mantém-se inalterada desde que a altura das obras mortas não altere.

Com efeito, muitos dos aspectos de estabilidade são piores.

Pelo contrário, se o ponto G baixar, causando a diminuição de KG, todos os valores de GZ serão aumentados, bem como aumentará o valor inicial de GM, e muitos dos aspectos de estabilidade serão melhorados (é o efeito contrário do caso anterior).

9.2- Efeito da movimentação transversal de pesos (*list*)

A “*list*” pode aumentar no navio como resultado dos seguintes factores:

- a) Carga, descarga e mudança de carga geral para além da linha de mediania;
- b) Carga, descarga e transfega de lastro, combustível e óleo lubrificante para além da linha de mediania;
- c) Mudança transversal da posição do ponto G devido à suspensão de pesos durante operações de carga e descarga com recurso a gruas, fora da linha de mediania;
- d) Alterações durante as navegações tais como: consumo de combustível, água e géneros localizados fora da linha de mediania, acumulação assimétrica de gelo no convés ou nas superestruturas, acumulação de água no convés devido a más condições climáticas fora da linha de mediania, deslocamento transversal de carga (mal estivada) fora da linha de mediania e introdução acidental de água do mar ou do rio devido a acidentes marítimos.

Considere-se um navio, inicialmente na posição de direito com o ponto G sobre a linha de mediania, e que é adornado por acção de uma força exterior até determinado

ângulo de adornamento (pequeno ou grande), e com um peso w num dos bordos. Neste caso o braço endireitante é GZ :

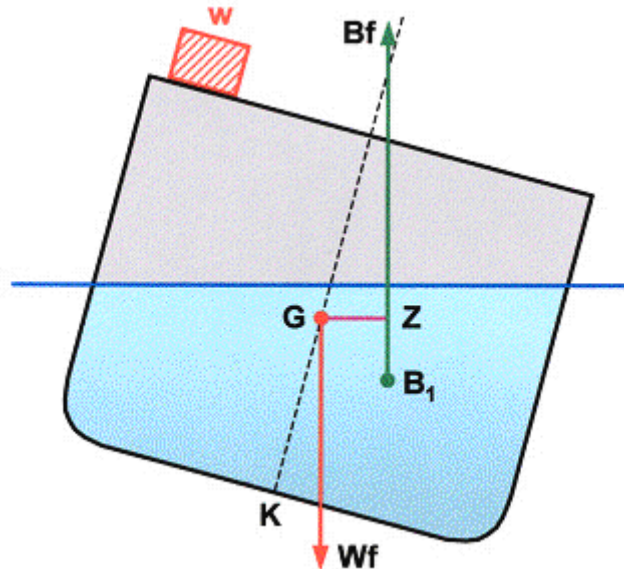


Fig. 9.3 – Navio adornado por uma força exterior com o ponto G sobre a linha de mediania.
[Rhodes, Martin (2003)]

Se o peso w for movimentado ao longo do convés até ao outro bordo do navio, provocará uma movimentação transversal de G (e paralela à movimentação do peso w) para G_H (ver a seguinte figura).

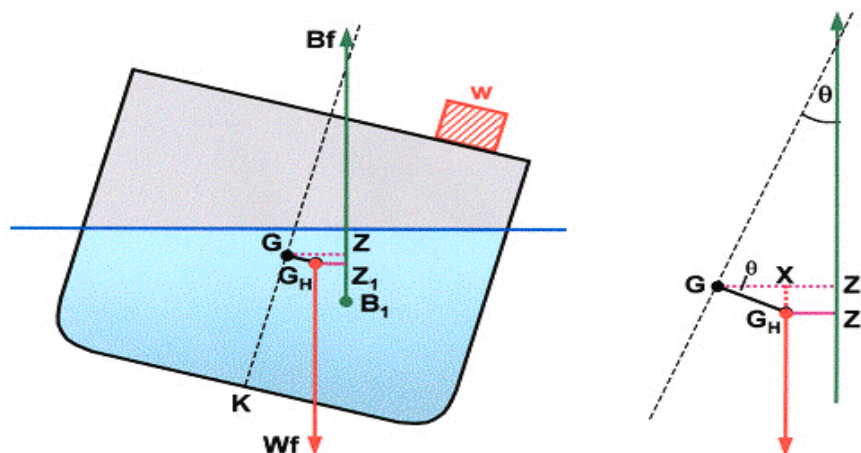


Fig. 9.4 – Peso movimentado ao longo do convés depois do navio ser adornado por uma força exterior com o ponto G , inicialmente, sobre a linha de mediania.

O braço endireitante foi reduzido de GZ para $G_H Z_1$ como resultado da mudança transversal do peso w.

A alteração de GZ para determinado ângulo de adornamento pode fácilmente ser calculado.

Para efeitos de explicação vamos considerar um navio com estabilidade positiva até aos 90°.

Se G se mover para fora da linha de mediania para a posição G_H , a perda de GZ é dada por:

$$\text{Perda de GZ} = GG_H \times \cos \theta$$

Como Coseno 0° = 1 e Coseno 90° = 0, conclui-se que:

A perda de GZ diminui com o aumento do ângulo de adornamento, ou seja, a maior perda de GZ será quando o navio estiver direito (GZ com valor negativo).

O efeito na curva de estabilidade transversal inicial é a seguinte:

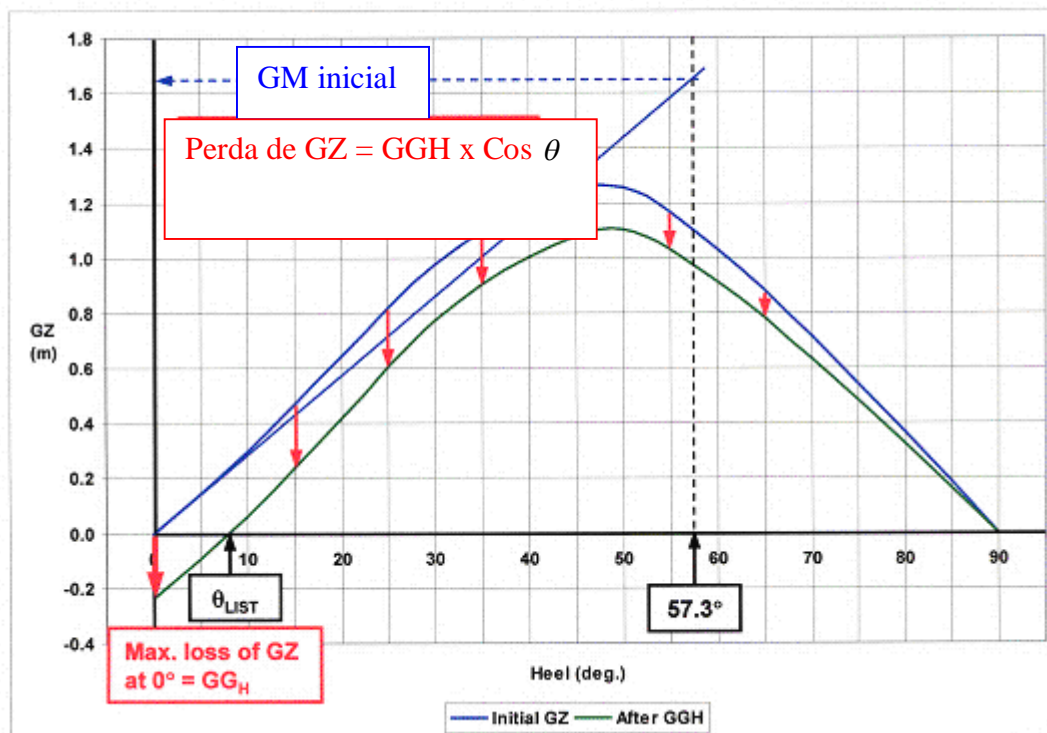


Fig. 9.5 – Alterações na curva de estabilidade devido ao movimento transversal de pesos.
[Rhodes, Martin (2003)]

Ou seja:

- a) A altura metacêntrica inicial GM mantém-se inalterável;
- b) Todos os valores de GZ ao longo da gama de estabilidade são reduzidos, particularmente para ângulos pequenos;
- c) A estabilidade dinâmica (área abaixo da curva) é reduzida. Se o navio estiver inicialmente adornado será necessário menos trabalho efectuado por forças exteriores para adorná-lo, até ângulos perigosos de adornamento no lado “listed”;
- d) A gama de estabilidade é reduzida;
- e) O ângulo de adornamento correspondente à imersão do convés mantém-se inalterada, mas é necessário menos trabalho por parte de forças exteriores, para alcançá-lo.

9.3- Efeito da alteração da altura de bordo livre (altura das obras mortas) para boca constante, imersão e KG

Uma alteração da altura de bordo livre, e da altura das obras mortas, pode resultar de:

- a) Cargas e descargas que causam alteração de imersão;
- b) Cargas e descargas de lastro, combustível e óleo lubrificante;
- c) Deposição de gelo nas superestruturas (particularmente em navios pequenos);
- d) Introdução de água no interior do navio devido a acidentes;
- e) Introdução de água no convés devido às condições climáticas.

Considere-se dois navios com características semelhantes e com a mesma boca, imersão e KG mas em que um deles possui maior altura de obras mortas.

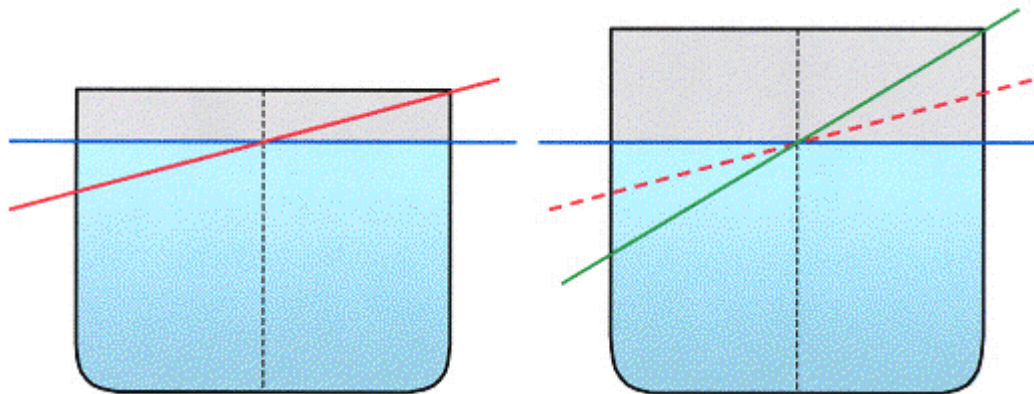


Fig. 9.6 – Navios com a mesma boca e diferentes bordos livres.

Para ângulos de adornamento até ao ângulo correspondente à imersão total do costado de qualquer dos bordos, a curva de estabilidade estática ou transversal será exactamente a mesma.

Para ângulos de adornamento superiores ao ângulo correspondente à imersão total do costado, os valores do braço endireitante GZ serão maiores para o navio com maior altura de costado. Isto é o resultado da continuação do aumento da área de flutuação e por consequência do maior valor de BM (ver a fórmula completa de estabilidade do capítulo anterior).

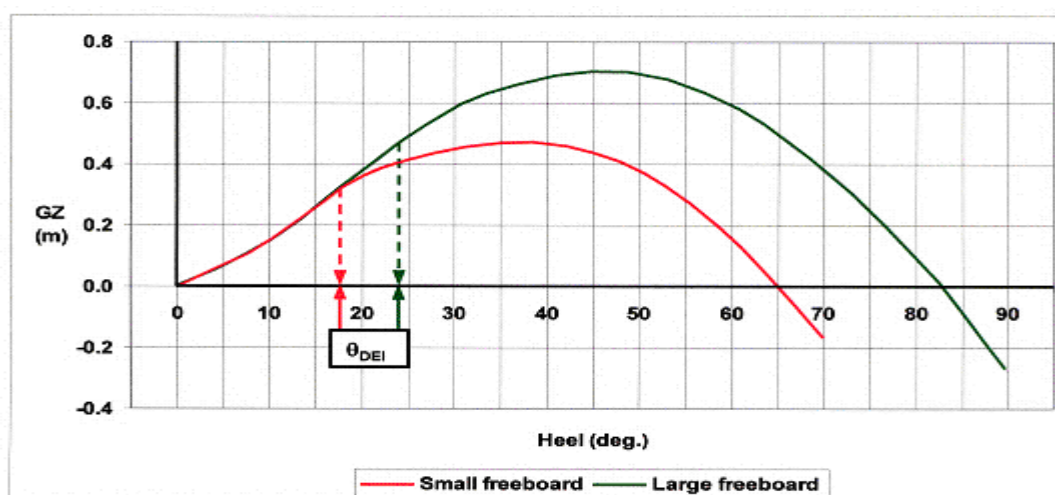


Fig. 9.7 – Curvas de estabilidade para navios com diferentes bordos livres.
[Rhodes, Martin (2003)]

O efeito do aumento de bordo livre traduz-se em:

- a) A altura metacêntrica inicial GM mantém-se inalterada;
- b) Os valores de GZ serão aumentados para ângulos superiores ao ângulo correspondente à imersão total de costado, para navios com maior altura de costado;
- c) A estabilidade dinâmica (área abaixo da curva) aumenta com o aumento da altura do costado;
- d) A gama de estabilidade positiva aumenta com o aumento da altura de costado.

9.4- Comparação da estabilidade de um navio na condição de leve e na condição de carregado

A próxima figura ilustra o diagrama metacêntrico para um determinado navio.

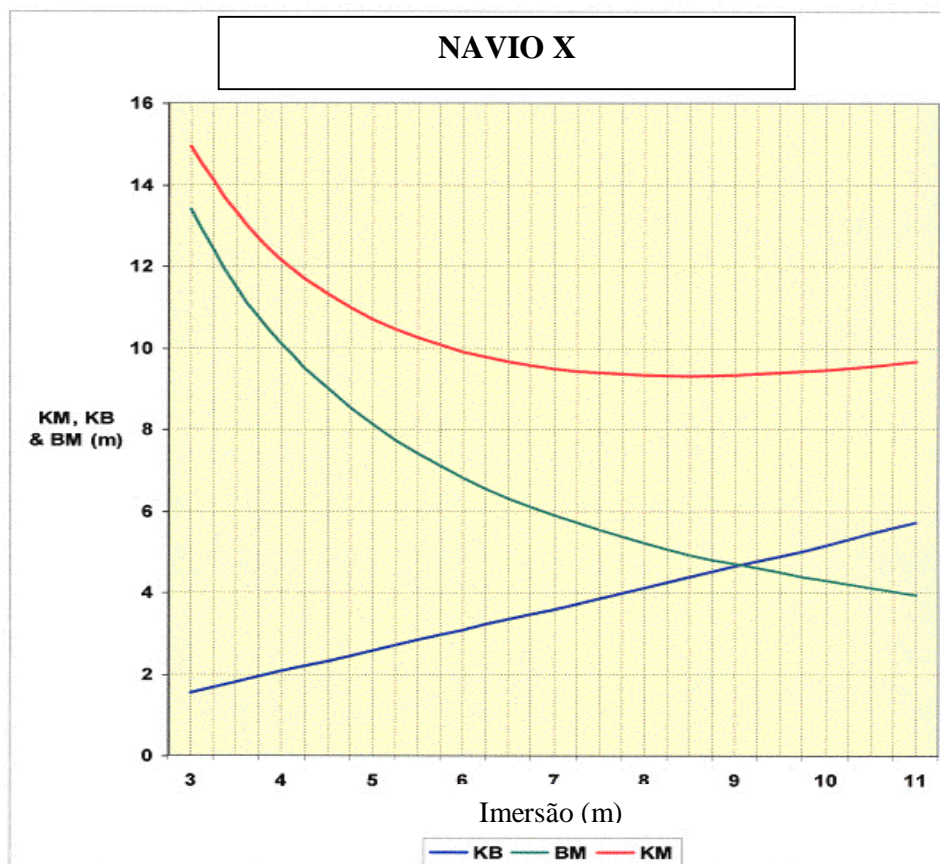


Fig. 9.8 – Exemplo de um diagrama metacêntrico de um navio.
[Rhodes, Martin (2003)]

À medida que o navio é progressivamente carregado (por exemplo com a introdução de pesos a bordo, durante a estiva de carregamento), desde a condição de navio leve até à condição de navio carregado, o KM diminui.

$$KM = KB + BM$$

O KB, obviamente, aumenta com a imersão, enquanto que o BM diminui, como explicado anteriormente.

Considere-se a seguinte figura:

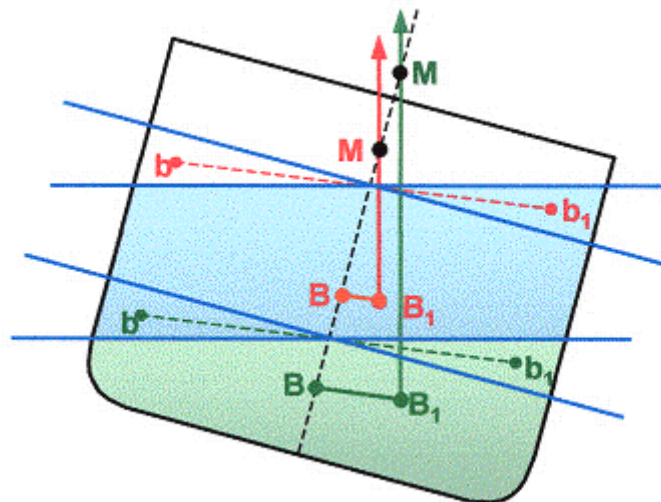


Fig. 9.9 – Navio na condição de leve e na condição de carregado.
[Rhodes, Martin (2003)]

O movimento do ponto B para qualquer ângulo de adornamento pode ser calculado através de:

$$BB_1 = \frac{v \times bb_1}{V}$$

Onde:

v é o volume da cunha de líquido transferido;

bb1 é a distância percorrida pelo centróide da cunha de líquido transferida;

V é o volume de líquido correspondente ao deslocamento do navio.

Na condição de carregado o volume da cunha de líquido deslocado representa uma pequena parte do volume total correspondente ao deslocamento do navio; facto que não sucede na condição de navio leve.

Assim o BM diminui à medida que a imersão aumenta. Para a gama de imersões operacionais de um navio, o KM geralmente decresce à medida que a imersão aumenta [D'Oliveira, Rogério (2001)].

A figura seguinte faz uma comparação das curvas de estabilidade do mesmo navio na condição de navio leve e navio carregado. A linha vermelha é para um valor menor de KG, o que providencia uma condição de carregamento mais confortável.

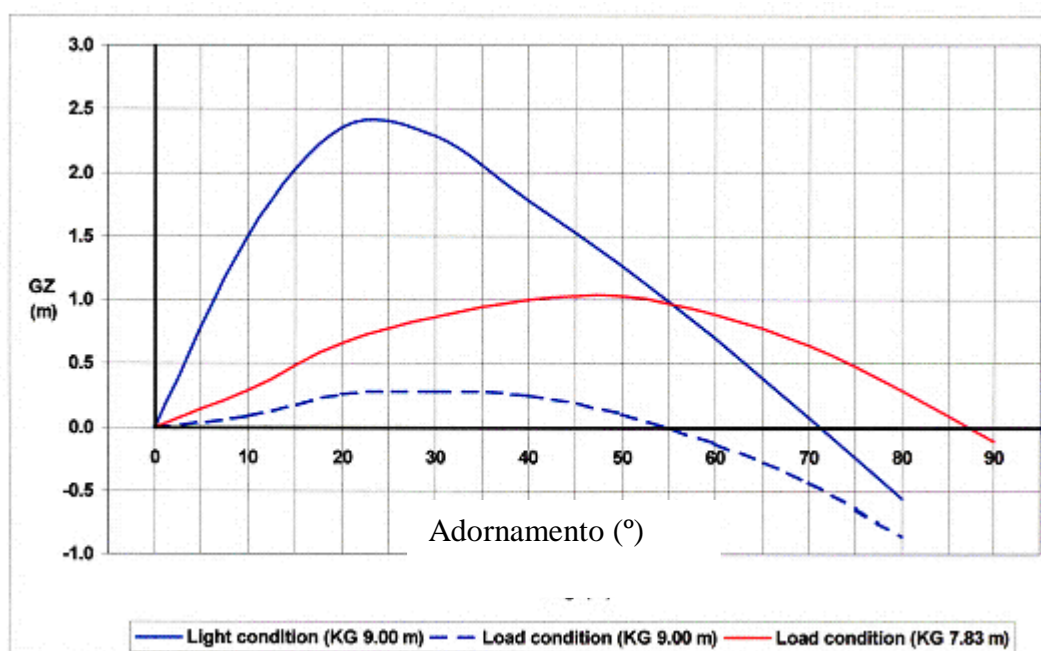


Fig. 9.10 – Curvas de estabilidade de um navio na condição de leve e na condição de carregado.
[Rhodes, Martin (2003)]

Se analisarmos os valores de GZ sómente para um determinado valor de KG, o navio torna-se menos estável à medida que é carregado; mas no entanto:

$$\text{MOMENTO ENDIREITANTE (t.m)} = \text{GZ (m)} \times \text{DESLOCAMENTO (t)}$$

As curvas do momento endireitante mostram que o acréscimo de pesos no navio requer mais trabalho pelas forças exteriores para adornar o navio, para a mesma condição de carga e se os pesos forem colocados abaixo do centro de gravidade inicial.

9.5- Efeito da boca

A figura seguinte mostra dois cascos com forma prismática, com bocas diferentes e com a mesma imersão e mesma altura do centro de gravidade KG, adornados com o mesmo ângulo.

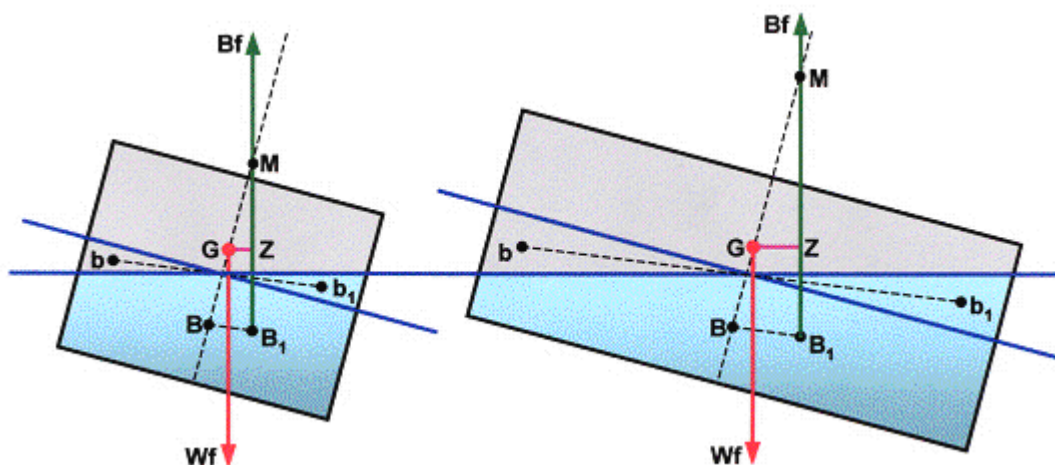


Fig. 9.11 – Navios com bocas diferentes, com a mesma imersão e mesma altura do centro de gravidade KG.
[Rhodes, Martin (2003)]

A movimentação do centro de impulsão pode ser calculado por:

$$BB_1 = \frac{v \times bb_1}{V}$$

Onde v é o volume da cunha de líquido transferida, bb_1 é a distância percorrida pelo centróide da cunha de líquido, e V é o volume de líquido correspondente ao deslocamento do navio.

Devido ao facto do volume da cunha de liquido e da distância bb_1 serem maiores para o navio de maior boca, o comprimento BB_1 é muito maior. Isto provoca um maior valor da altura do metacentro KM (e de GM), e assim, a estabilidade inicial também é maior para o navio de maior boca, como se pode constatar no diagrama seguinte:

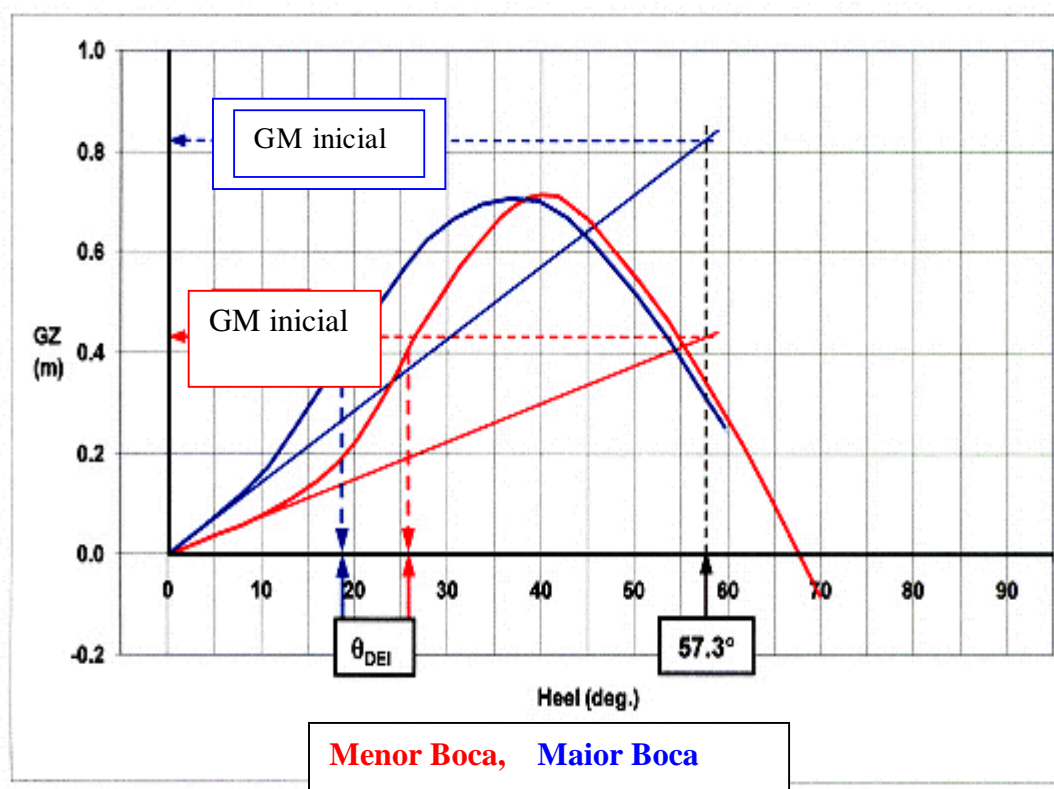


Fig. 9.12 – Efeito da boca na estabilidade transversal inicial.
[Rhodes, Martin (2003)]

O efeito do aumento da boca provoca:

- O aumento do GM inicial devido ao aumento do BM;
- O aumento dos valores iniciais de GZ ;
- A estabilidade dinâmica (área abaixo da curva) é aumentada inicialmente;
- O ângulo em que ocorre a imersão do convés é reduzido;
- A gama de estabilidade pode aumentar ou diminuir. Isto depende da altura inicial de bordo livre: quanto menor for a altura de bordo livre e maior o aumento da boca, maior é a redução do ângulo de adornamento

correspondente à imersão do convés, o que pode causar uma redução da gama de estabilidade. Se o bordo livre for grande, qualquer aumento moderado da boca resultará no aumento da gama de estabilidade.

9.6- Efeito do caimento do navio

Nesta secção far-se-á uma abordagem muito resumida sobre a problemática da estabilidade devido a alterações de caimento.

A altura metacêntrica longitudinal é muito superior à altura metacêntrica transversal, pois KM_L (altura do metacentro longitudinal) é bastante superior, porque o comprimento efectivo da área de flutuação é grande.

Com caimento o BM transversal aumenta devido ao aumento do momento de inércia (I) da área de flutuação, e consequentemente o KM transversal aumenta e para determinado valor de KG os valores de GM transversal e de GZ transversal são aumentados, para pequenos ângulos de adornamento.

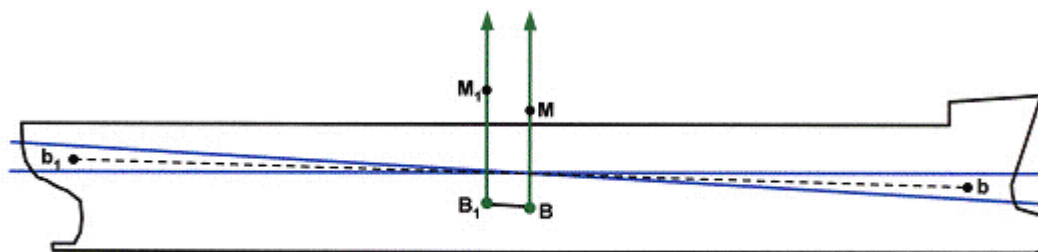


Fig. 9.13 - Aumento do KM transversal causado pelo aumento de caimento a ré.

O aumento da estabilidade inicial supera no entanto os efeitos da redução de bordo livre a ré do navio (no caso de caimento a ré, como na figura anterior). Neste caso quando o navio possui movimentos de cabeceio, a parte de ré do navio pode imergir mais facilmente, o que resulta na redução dos valores de GZ a meio da curva GZ, como se pode verificar pela análise da figura seguinte:

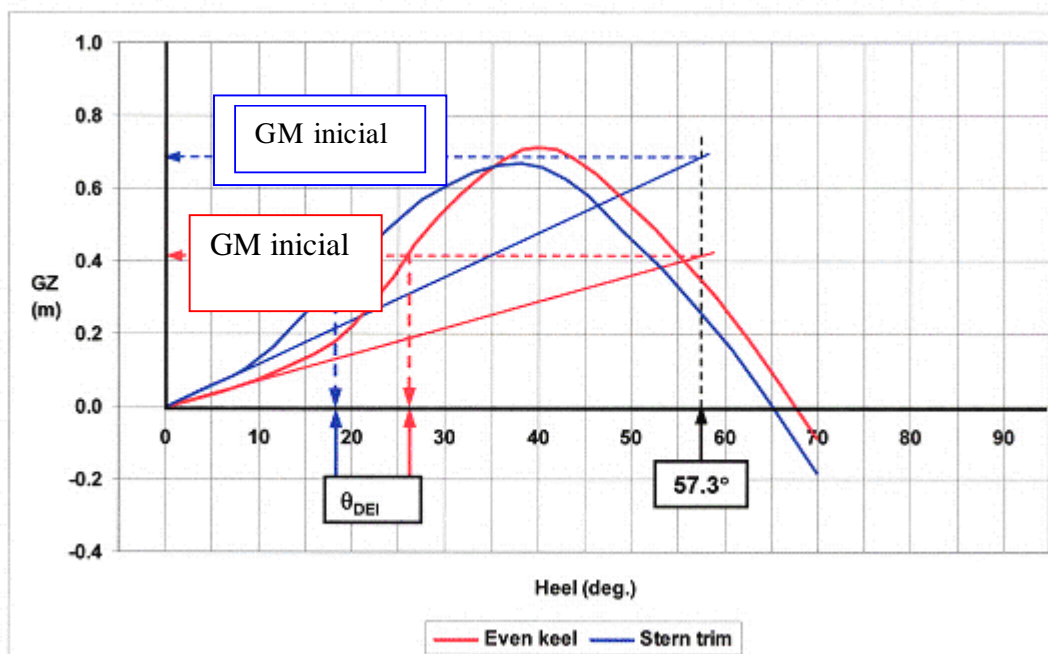


Fig. 9.14 – Alteração da curva de estabilidade causada pelo aumento de caimento a ré.
[Rhodes, Martin (2003)]

O efeito do caimento a ré de um navio pode ser traduzido em:

- O valor inicial de GM aumenta como resultado do aumento de KB e de BM;
- Os valores de GZ são aumentados inicialmente;
- A estabilidade dinâmica é aumentada inicialmente;
- O ângulo em que ocorre a imersão do convés é reduzido (a ré do navio);
- A gama de estabilidade provavelmente diminui.

10- PROVA DE ESTABILIDADE

O Regulamento que regula as condições de segurança da navegação e consequentemente no que concerne à estabilidade de navios, requiere para todos os navios de passageiros independentemente do tamanho, e para os navios de carga de comprimento igual ou superior a 24 m, provas de estabilidade (provas de inclinação),

de modo a obter o valor da altura do centro de gravidade KG na condição de navio leve.

Estas provas devem ser efectuadas com rigor porque o valor de KG para navio leve, bem como o valor do deslocamento, são as bases a partir das quais é determinado o KG para as outras condições do navio. Um erro na determinação do KG leve, e assim em todos os outros KG, resultarão em erros na determinação de outros parâmetros da estabilidade tais como os valores de GM, GZ e de estabilidade dinâmica.

Durante a experiência, a posição longitudinal do centro de gravidade (LCG) para a condição de navio leve, também poderá ser determinada.

A condução de uma experiência de inclinação justifica-se pela necessidade de determinar experimentalmente, o deslocamento de um navio e as coordenadas vertical e longitudinal do seu centro de gravidade.

A experiência de inclinação consiste em adonar o navio de um pequeno ângulo, movendo para tal um peso de valor conhecido, já embarcado previamente, numa trajectória perpendicular ao plano de mediania do navio a uma distância conhecida, d , como se pode ver na seguinte figura. Após a movimentação do peso aguarda-se que o movimento de balanço do navio cesse. Quando o movimento cessar estamos na situação em que os Momentos Inclinate e Endireitante se igualaram em magnitude, sendo essa a altura em que deve ser feita a leitura do ângulo de inclinação [Soares, Guedes (1988)].

O processo deve ser repetido para várias inclinações e para ambos os bordos.

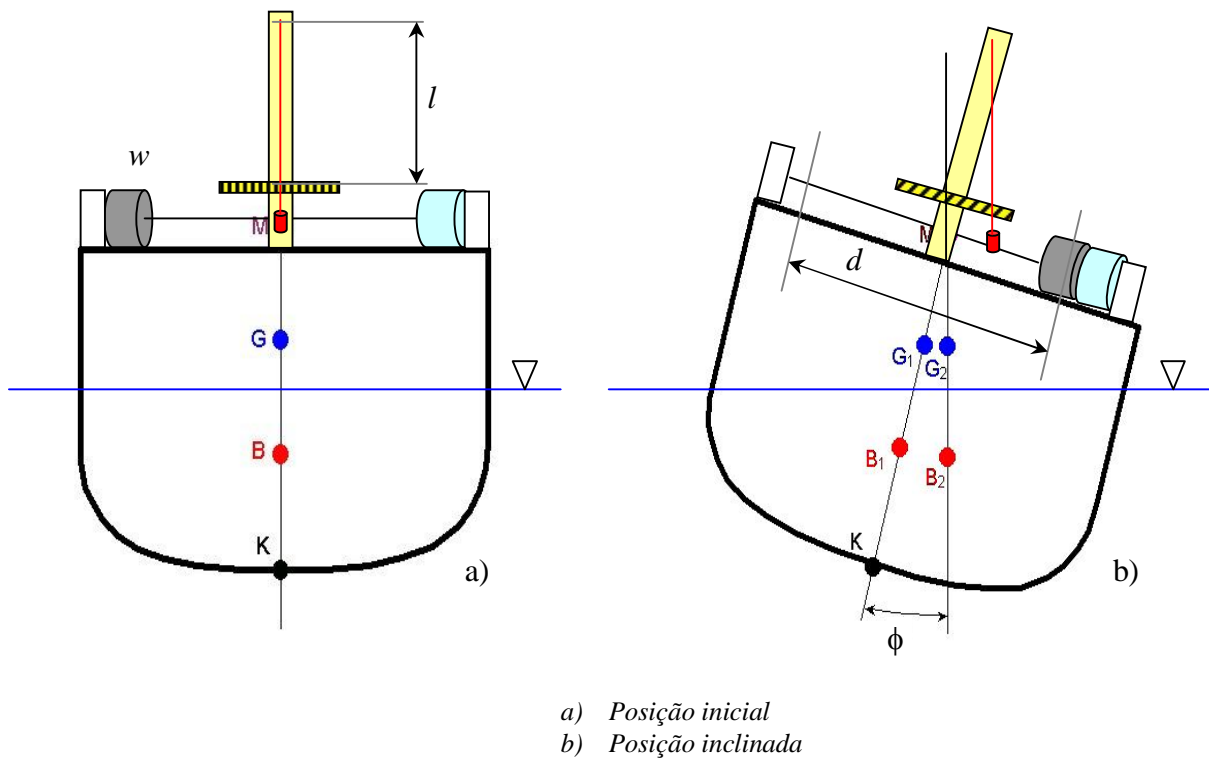


Fig. 10.1 – Experiência de inclinação.

A Altura Metacêntrica é também determinada na referida experiência e, sendo já conhecida por determinação analítica, servirá também como elemento de validação da Prova de Estabilidade.

A Altura Metacêntrica é determinada da seguinte forma:

a) Tal como abordado anteriormente, o Braço Endireitante, GZ , a um pequeno ângulo de inclinação, ϕ , é:

$$\overline{GZ} = \overline{GM} \sin \phi$$

De onde se infere que o Momento Endireitante é:

$$W \cdot \overline{GZ} = W \cdot \overline{GM} \sin \phi$$

Onde W é o deslocamento do navio ou modelo. Num navio este valor é obtido pela leitura das marcas de calado; porém, no caso de um modelo, este valor é conhecido e indicado nas características do mesmo.

b) O Momento Inclínante, M , provocado pelo movimento de um peso, w , a bordo do modelo, ou do navio, perpendicularmente ao seu plano de mediania, por uma distância, d , ao mesmo, é:

$$M = w \cdot d \cos \phi$$

c) Uma vez que Momento Endireitante e Inclínante se igualam no momento em que a inclinação, ϕ , é medida:

$$W \cdot \overline{GM} \sin \phi = w \cdot d \cos \phi$$

$$\overline{GM} = \frac{w \cdot d \cos \phi}{W \sin \phi} = \frac{w \cdot d}{W \cdot \tan \phi}$$

A altura do Centro de Gravidade, KG , é determinada subtraindo a Altura Metacêntrica, GM , da Altura do Metacentro acima da Quilha, KM .

$$\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM}$$

A Altura do Metacentro Transversal KM é por norma retirada, após leitura das marcas de calado, através do conhecimento do deslocamento e da interpretação das curvas hidrostáticas, características de cada navio. No caso do modelo, como será posteriormente demonstrado e uma vez que não existem estas curvas, a Altura do Metacentro Transversal é determinada através do conhecimento do \overline{KG} , quer analítico, quer derivado da experiência de suspensão, efectuada aquando da medição do raio de giração do modelo para o movimento de balanço transversal, k .

10.1- Cálculo de KG na condição de adornado

É pouco provável que um navio esteja na condição pura de navio leve, quando inclinado na experiência de inclinação. Normalmente esta prova é feita com o navio próximo da condição normal de carga. Uma vez determinado o KG e o deslocamento respectivo, não devem ser retirados nem acrescentados quaisquer pesos a bordo, e devem ser contabilizados todos os pesos móveis, bem como devem ser considerados os eventuais efeitos por espelhos líquidos na altura da experiência.

Antes das provas começarem, o navio deve estar exactamente na posição de direito, de modo a assegurar que o centro de gravidade G do navio se encontra na mediania do navio. A figura seguinte mostra precisamente isso, bem como mostra o deslocamento de um peso móvel de valor conhecido, que é movido transversalmente no convés do navio de uma distância conhecida d em metros. O ponto G move-se para fora da linha de mediania para a posição G_H , causando o adornamento do navio.

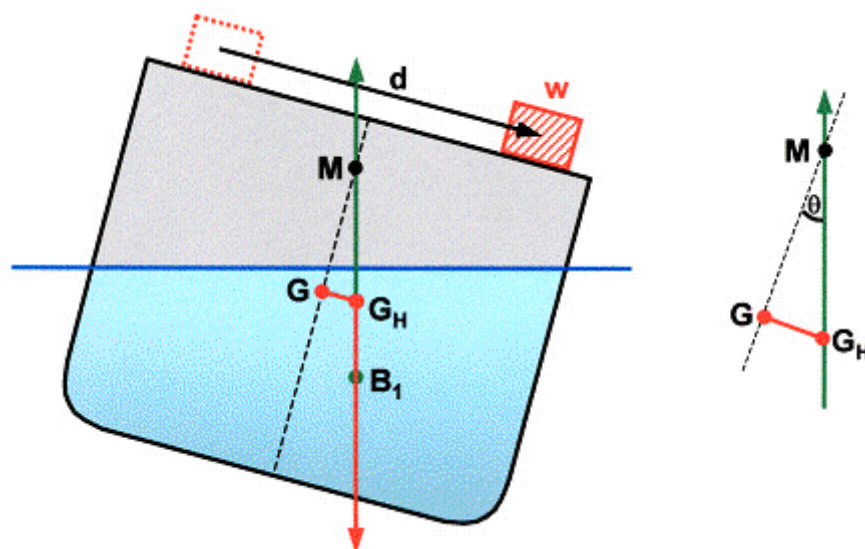


Fig. 10.2 – Deslocamento de um peso móvel durante a prova de estabilidade.

[Rhodes, Martin (2003)]

A distância GG_H é calculada pela fórmula:

$$GG_H = \frac{w \times d}{W}$$

Se um pêndulo fôr suspenso no ponto O (**para obter os ângulos de adornamento, pode-se usar também um inclinómetro de precisão**), o ângulo de adornamento pode ser calculado através da deflexão XY medida numa régua horizontal ao convés, e por intermédio de simples funções trigonométricas, como se pode constatar pela seguinte figura:

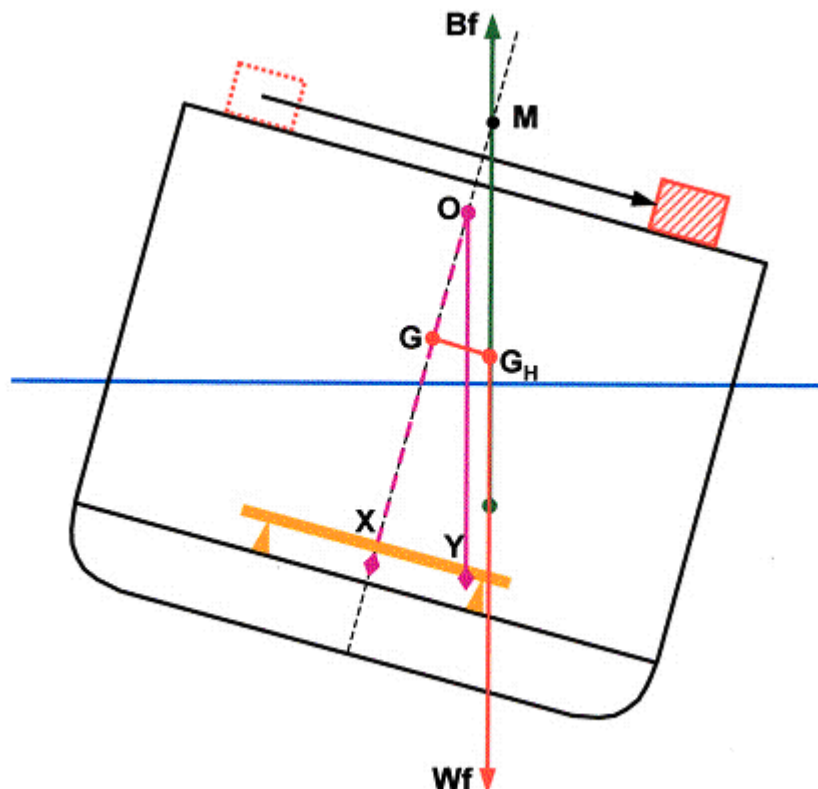


Fig. 10.3 – Esquema de obtenção dos ângulos de adornamento.

Da observação da figura temos que:

$$GM = GG_H \times \text{Comp. Pêndulo} / \text{Deflexão do Pêndulo}$$

Combinando as duas fórmulas anteriores temos que:

$$GM = (w \times d \times \text{Comp. Pêndulo}) / (W \times \text{Deflexão do Pêndulo})$$

A altura metacentrica GM é um GM “fluído”, pois inclui já quaisquer possíveis efeitos por espelhos líquidos. Como

$$KG = KM - GM$$

e como o KM é obtido pela leitura das cartas hidrostáticas do navio (entrando com a imersão média do navio), facilmente se obtém o valor de KG.

10.2- Preparativos para a prova de estabilidade (teste de inclinação)

Antes da prova de inclinação ser realizada, devem ser tomadas as seguintes considerações [D’Oliveira, Rogério (2001)]:

- a) O navio deve ser bem amarrado ao cais e numa zona de águas calmas, livre do efeito de ondas causadas pela passagem de outros navios. Deve existir suficiente profundidade na zona de provas, de modo a que o casco não toque no fundo durante a prova;
- b) A amarração não deve estar muito apertada de modo a permitir o adorno livre do navio durante as provas;
- c) Todo o material móvel deve estar peado (amarrado) ao navio, bem como deve estar só o pessoal mínimo a bordo para a realização das provas;
- d) Os tanques de líquidos devem estar completamente cheios ou completamente vazios, ou se não for possível, deve estar previamente calculado o efeito dos espelhos líquidos;

- e) O convés deve estar livre de água, de neve e de gelo;
- f) A seguinte informação deve estar disponível antes das provas: curvas hidrostáticas, plano de arranjo geral do navio, curvas de carenas inclinadas, plano de capacidades com o VCG e LCG de todos os espaços de carga e de tanques, tabelas de sondagens dos tanques, localização das marcas de calado, desenhos de docagem com o perfil da quilha e correcções das marcas de calado (se fôr possível);
- g) Comunicações eficientes entre o responsável pela prova, a estação de controlo, os operadores dos pesos e as estações de pêndulos.

Os requisitos a observar para se obter valores correctos são:

- a) O navio deve estar o mais completo possível na altura das provas. A massa e o centro de gravidade dos itens peados devem ser conhecidos;
- b) O navio deve estar na posição de direito no início das provas e deve ter suficiente imersão de modo a evitar alterações significativas da área de flutuação, quando o navio fôr inclinado;
- c) A massa dos pesos usados nas provas de inclinação deve ser suficiente de modo a provocar um adornamento mínimo de 1° e um adornamento máximo de 4° para cada bordo. Isto assegura que a fórmula:

$$\tan \theta_{LIST} = \frac{GG_H}{GM}$$

mantém-se válida e aplicável para ângulos pequenos de adornamento. Os pesos inclinantes devem ser marcados com um número de identificação e com a sua massa. Como alternativa aos pesos inclinantes pode-se utilizar a transfega de tanques de lastro para navios de maior porte;

- d) O uso de três pêndulos (não menos de dois) é recomendado de modo a minorizar o erro de leitura. Os pesos dos pêndulos devem ser mergulhados em óleo hidráulico de modo a amortecer os movimentos de oscilação dos mesmos, e devem ter o comprimento suficiente de modo a se obter deflexões na régua graduada de cerca de 15 cm (comprimento de cerca de 3 m).

Normalmente quanto mais comprido fôr o fio do pêndulo menor o erro de leitura. O fio dos pêndulos devem ser do tipo de fios de piano e a ligação superior ao pivot de rotação deve possuir o menor atrito possível;

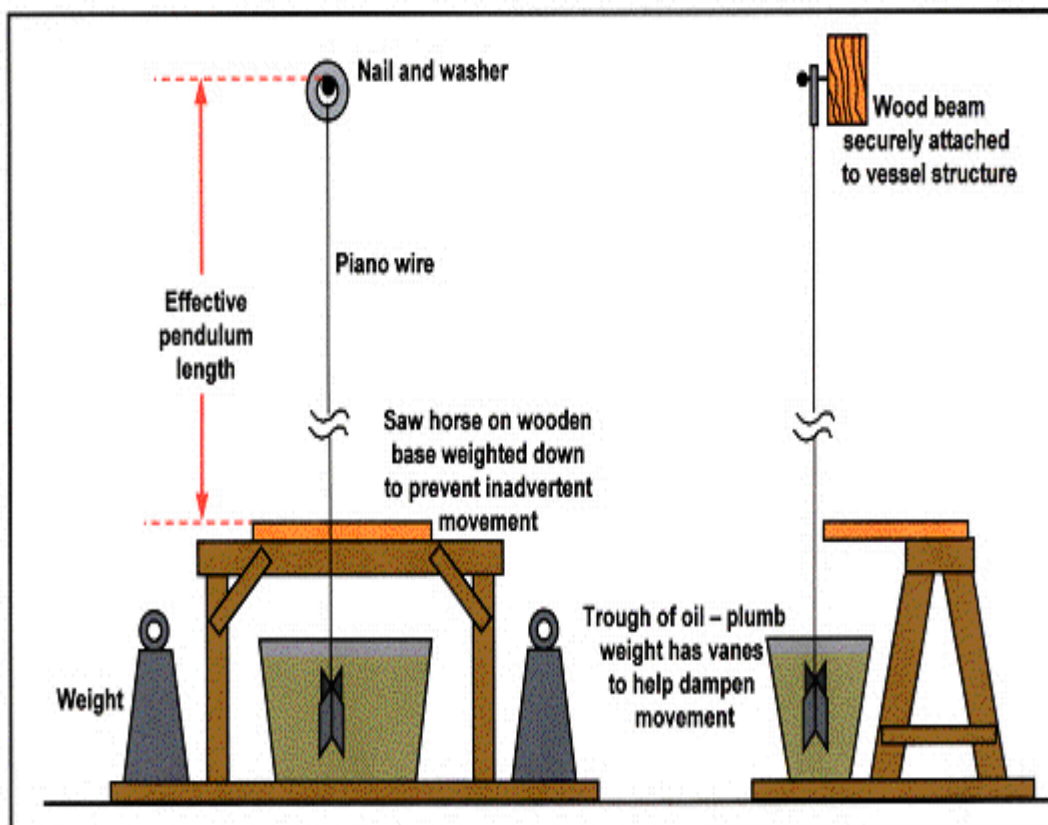


Fig. 10.4 – Colocação do pêndulo.
[Rhodes, Martin (2003)]

- e) A régua graduada para a leitura das deflexões deve estar bem marcada e com os números bem visíveis;
- f) Recomenda-se fazer 5 leituras para cada inclinação igualmente espaçadas em tempo, bem como se deve registrar o caimento a ré, meio-navio e a vante para cada prova (para se obter a área de flutuação). Deve ser providenciada uma pequena embarcação para o efeito, assim como se deve saber com alguma exactidão a densidade da água onde o navio se encontra (para se obter o

deslocamento do navio através da utilização das curvas hidrostáticas, com as correções necessárias);

- g) Todas as provas que fornecem valores duvidosos devem ser repetidas;
- h) Os testes standard prevêem 8 movimentos de pesos inclinantes, em que uma linha deve ser traçada como ilustrado na seguinte figura;
- i) Se esta linha direita não fôr encontrada, significa que houve erros na medição dos valores, e as experiências devem ser repetidas.

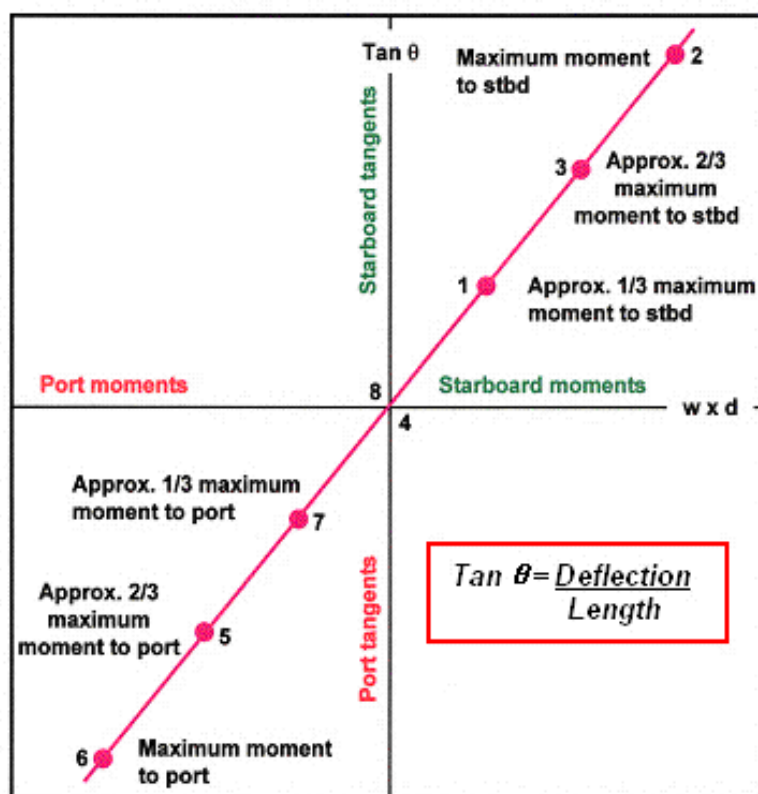


Fig. 10.5 – Recta de regressão.
[Rhodes, Martin (2003)]

O cálculo de deslocamento leve do navio, do KG, imersão e ângulos de adornamento durante a realização da prova de estabilidade, devem ser utilizados para a determinação da posição longitudinal do centro de gravidade do navio, e deve ser corrigida de modo a obter-se o verdadeiro LCG do navio.

Depois de completadas as provas, deve ser elaborado um relatório e incluído no livro de estabilidade do navio.

Sempre que houver alterações na estrutura do navio e/ou adição e /ou remoção de pesos a bordo (com algum significado), deve ser efectuada nova prova de estabilidade.

A prova de estabilidade também é adaptável para navios e embarcações com comprimento inferior a 24 metros.

10.3- Apresentação de resultados

O objectivo último da Prova de Estabilidade é, como já foi referido, a determinação da posição vertical do Centro de Gravidade, VCG ou \overline{KG} . Contudo, a apresentação de todos os elementos que aí permitiram chegar, deve ser efectuada no relatório da prova, devendo ser tidos em conta os seguintes pontos [*D’Oliveira, Rogério (2001)*]:

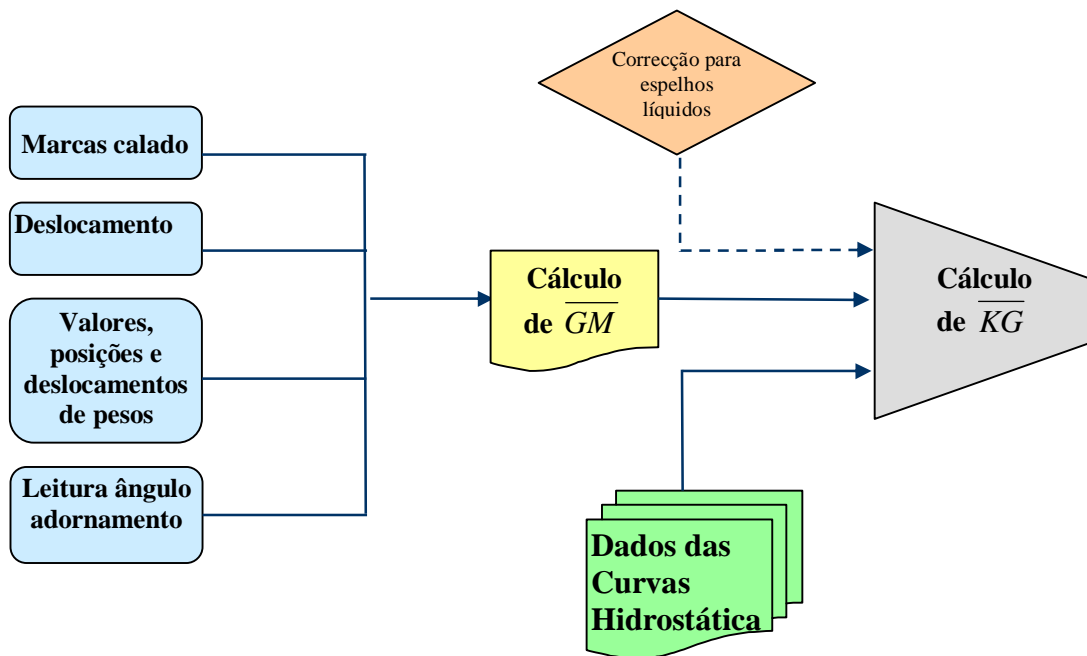
- Leituras das marcas de calado e posição das mesmas;
- Deslocamento;
- Volume específico da água onde se efectua a Prova de Estabilidade;
- Valores dos pesos utilizados para a Prova e sua localização, vertical e longitudinal a bordo;
- Inventário pormenorizado de todos os pesos que se queiram remover após a execução da experiência;
- Mudanças de pesos e momentos inclinantes associados;
- Leitura da deflecção do pêndulo e indicação de $\tan\phi$. No caso de se fazerem várias leituras de deflecção para o mesmo adorno, deverá apresentar-se uma recta de

regressão linear que relacione $\tan\phi$ com os momentos aplicados, $w \times d$, como representado na figura anterior;

- Correção para o efeito de espelhos líquidos, quando necessário;

- Cálculo final de \overline{KG} .

Fluxograma de Processo da Prova de Estabilidade:



Quadro nº 10.1 – Fluxograma de Processo da Prova de Estabilidade.

11- ÂNGULO DE ADORNAMENTO NA GUINADA DO NAVIO

Durante a guinada de um navio, o navio adorna para o bordo oposto relativamente ao bordo para onde guina, isto é: se o navio guinar para estibordo, o navio adornará para bombordo e vice-versa.

11.1- Termos relativos ao círculo de giração do navio

A figura seguinte mostra o rumo traçado por um navio durante a mudança de rumo para o rumo oposto ao inicial:

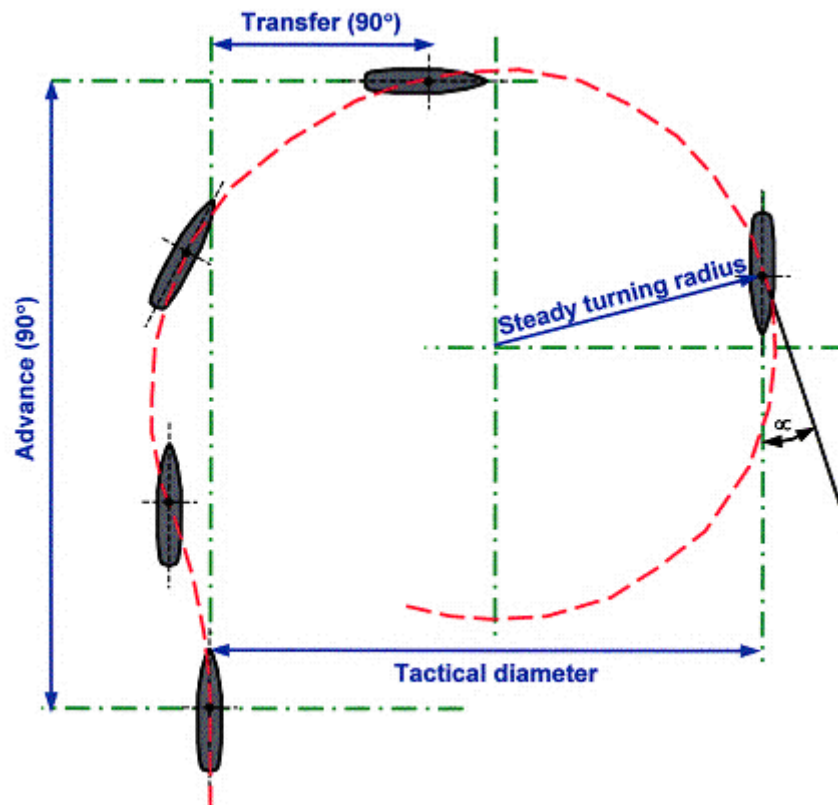


Fig. 11.1 – Rumo traçado por um navio durante a guinada.
[Rhodes, Martin (2003)]

O avanço (*advance*) corresponde à distância percorrida pelo centro de gravidade do navio, medida paralelamente ao rumo inicial do navio, desde o início da guinada até o navio obter um rumo perpendicular ao inicial.

A distância de transferência é a distância percorrida pelo centro de gravidade do navio numa direcção perpendicular ao rumo inicial do navio (quando o rumo é de 90° desfasado do rumo inicial).

O diâmetro tático (*tactical diameter*) corresponde à distância percorrida pelo centro de gravidade do navio numa direcção perpendicular ao rumo inicial do navio, depois do navio alterar o seu rumo em 180° (rumo oposto ao inicial).

O raio de giração (*steady turning radius*) corresponde ao raio do círculo efectuado pelo navio quando guina com um ângulo constante de giração. Este raio é calculado normalmente entre o rumo de 90° e o rumo de 180° relativamente ao rumo inicial.

O ângulo de guinada (*Yaw*) é o ângulo formado entre a linha tangente ao círculo de giração e que passa pelo centro de gravidade, e a linha de mediania do navio, em qualquer instante durante a giração.

11.2- Forças responsáveis pelo adorno durante a guinada

Considere-se um navio a guinar para estibordo. Quando o leme é movido para estibordo, surge uma força de pressão na face de estibordo na porta do leme, que dá origem a uma força resultante para bombordo F , cujo ponto de aplicação é o centro de pressões da porta do leme (P).

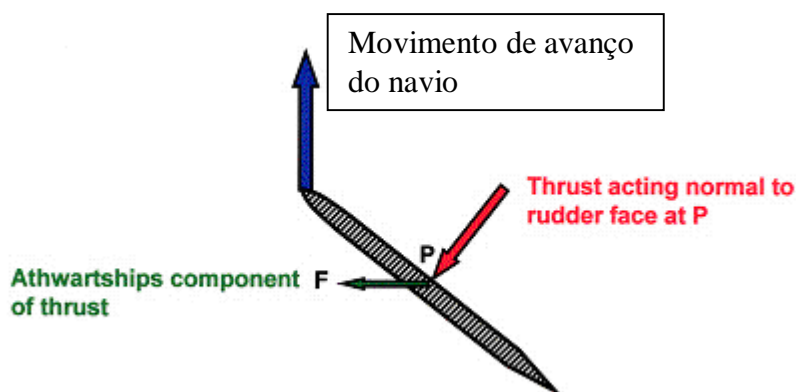
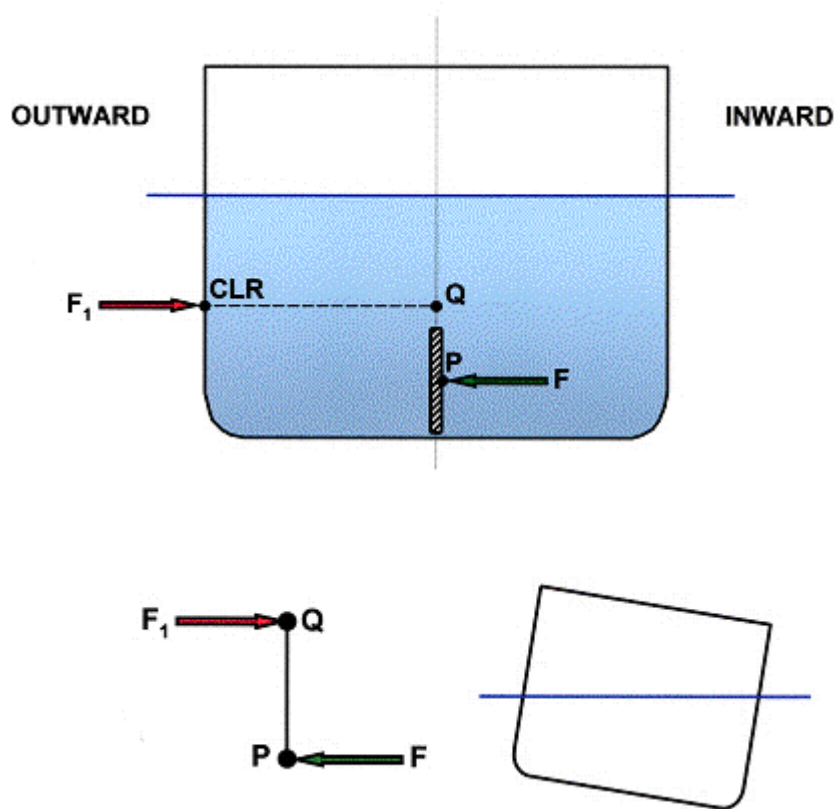


Fig. 11.2 – Forças actuantes na porta do leme durante a guinada.
[Rhodes, Martin (2003)]

Uma força com o mesmo módulo, mesma direcção e sentido oposto F_1 , surge como reacção à força F . Esta força F_1 actua no costado de bombordo e no centro de resistência

lateral (centre of lateral resistance CLR), que está localizado no centro geométrico da área longitudinal imersa, e acima do ponto P [Rhodes, Martin (2003)].



Initial inward heeling couple is created (for ship turning to starboard).

Fig. 11.3 – Binário de forças no adornamento inicial durante a guinada do navio (navio a guinar para estibordo).

As duas forças, F e F₁ formam um binário de forças cujo momento é dado por $\mathbf{F} \times \mathbf{PQ}$, que numa fase inicial faz com que o navio adorne para estibordo.

No entanto, se o navio manter a guinada para estibordo, este adornamento inicial é suplantado pelo efeito da força centrífuga que actua no centro de gravidade do navio G. A força centrífuga é dada por:

$\text{Força centrífuga (tons)} = \frac{WV^2}{gR}$
--

Onde W é o deslocamento do navio em t, V a velocidade do navio em m/s, g a aceleração gravitica terrestre ($9,81 \text{ m/s}^2$) e R o raio de giração em metros.

A força centrífuga é igual e oposta à força centrípeta que actua no centro de resistência lateral (CLR), em que se pode considerar, e sem grandes erros, que está à mesma altura do que o centro de impulsão B .

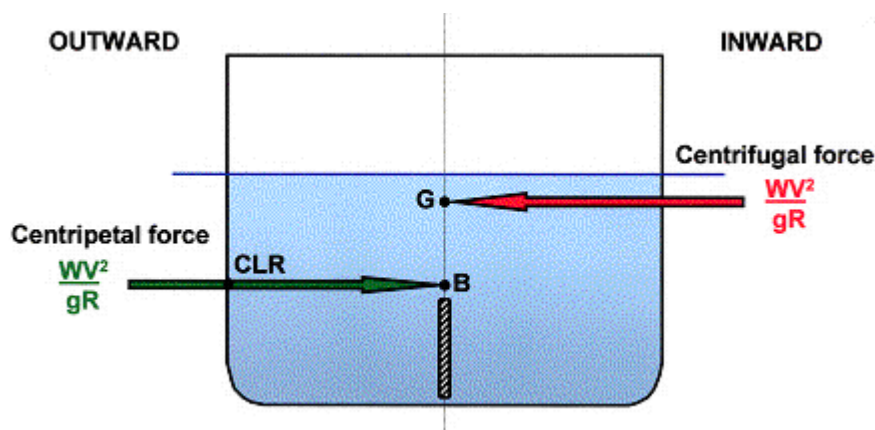


Fig. 11.4 – Força centrífuga e centrípeta durante a guinada do navio (navio a guinar para estibordo).
[Rhodes, Martin (2003)]

11.3- Cálculo do ângulo de adornamento durante a guinada

Como disse anteriormente, o momento inicial $F \times PQ$ é suplantado pelo momento resultante do binário criado pela força centrífuga e pela força centrípeta, e o navio, ao guinar, terá um ângulo de adornamento final para bombordo até se igualar o momento endireitante criado pelo adornamento do navio, que é igual, para pequenos ângulos a:

$$\text{MOMENTO ENDIREITANTE (t.m)} = GZ \text{ (m)} \times \text{DESLOCAMENTO (t)}$$

A figura seguinte ilustra o que se disse, quando o navio mantém a guinada constante (para estibordo):

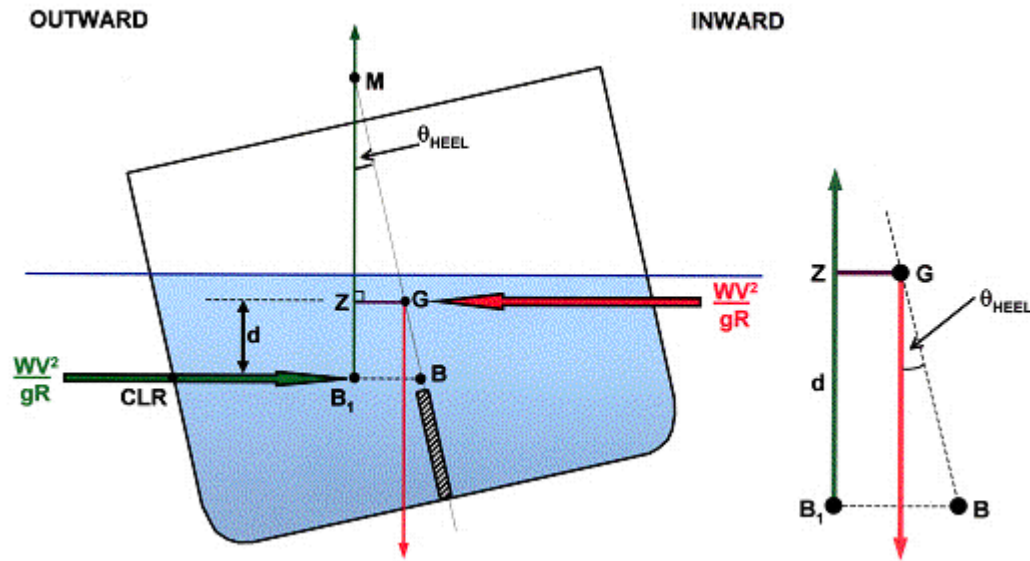


Fig. 11.5 – Binário de forças no adorno durante a guinada constante (navio a guinar para estibordo).

Na figura anterior B e B₁ são assumidas como estando à mesma profundidade, e como:

$$\cos \theta = \frac{\text{ADJ}}{\text{HYP}} = \frac{d}{BG}$$

Assim: $d = BG \times \cos \theta$

E como Momento endireitante = Momento inclinante

$$\therefore (W \times GZ) = \frac{WV^2}{gR} \times d$$

Se $d = BG \times \cos \theta$ and: $GZ = GM \times \sin \theta$

Então: $W \times GM \times \sin \theta = \frac{WV^2}{gR} \times BG \times \cos \theta$

$$\therefore gR \times W \times GM \times \sin \theta = WV^2 \times BG \times \cos \theta$$

Dividindo ambos os termos por $\cos \phi$:

$$\frac{gR \times W \times GM \times \sin \theta}{\cos \theta} = WV^2 \times BG$$

$$\therefore gR \times W \times GM \times \tan \theta = WV^2 \times BG$$

$$\therefore \tan \theta = \frac{WV^2 \times BG}{gR \times W \times GM}$$

Temos:

$$\tan \theta = \frac{V^2 \times BG}{g \times R \times GM}$$

A tendência inicial do navio guinar para “dentro do círculo de giração” não deve ser desprezada, pois no caso de no final de uma guinada, se colocar o leme a meio, e depois se guinar para o bordo contrário, o navio terá um adornamento excessivo para o bordo contrário, o que poderá causar danos internos (principalmente se a velocidade do navio fôr significativa) [Rhodes, Martin (2003)].

11.4- Cálculo da máxima imersão (aumento de imersão) durante o adornamento

Obviamente, que enquanto o navio adorna durante o movimento de mudança de rumo, a imersão aumenta no bordo exterior à rotação. O cálculo da imersão durante o adornamento na giração é importante para a segurança do navio e das pessoas.

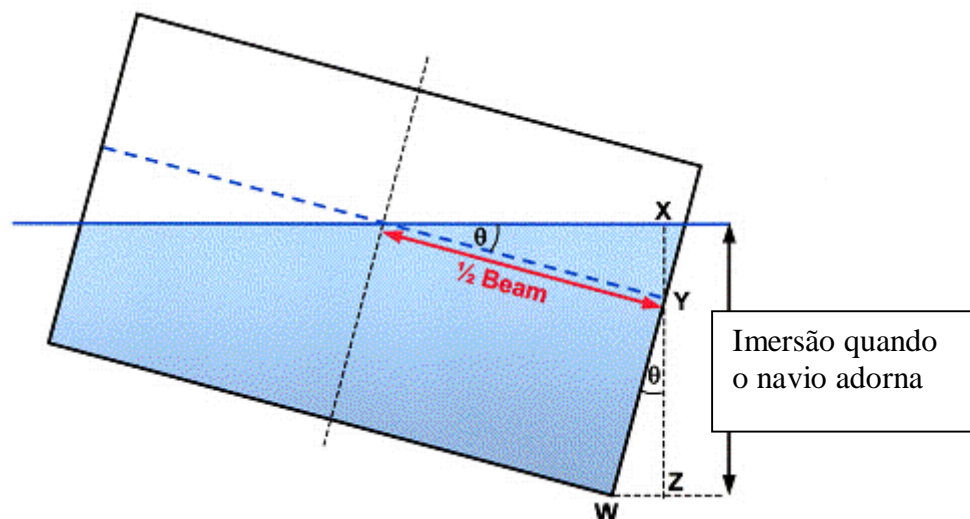


Fig. 11.6 – Imersão quando o navio adorna.

Pela figura anterior, constata-se que a imersão durante o adornamento è igual a $XY + YZ$, e que:

$$\therefore XY = \frac{1}{2} \text{ Beam} \times \sin \theta \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{\text{ADJ}}{\text{HYP}} = \frac{YZ}{\text{Upright draught}}$$

$$YZ = \text{Imersão (navio direito)} \times \cos \theta \quad (2)$$

Juntando as fórmulas (1) e (2) temos que:

$$\text{Imersão após adornamento} = XY + YZ = \frac{1}{2} \times \text{Boca} \times \sin \theta + \text{Imersão (navio direito)} \times \cos \theta$$

12- ADORNAMENTO CAUSADO PELO VENTO, DEPOSIÇÃO DE GELO E BALANÇO CAUSADO PELAS ONDAS

No mar, o navio experimenta o balanço resultante da acção do vento e das ondas simultaneamente. Nas altas altitudes a deposição do gelo nas superestruturas ocasiona a redução da estabilidade.

12.1- Adornamento devido ao vento

Como vimos anteriormente a curva dos momentos endireitantes para bombordo e para estibordo, é do seguinte tipo:

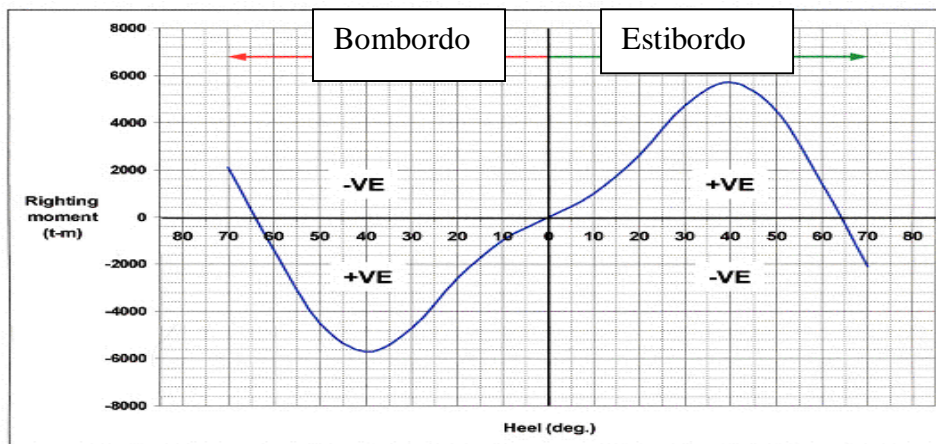


Fig. 12.1 – Curva dos momentos endireitantes para bombordo e para estibordo.

O momento endireitante é uma verdadeira medida da estabilidade de um navio, e é traçada através do produto do braço endireitante GZ pelo deslocamento do navio. Os ângulos de adornamento causados por ventos fortes, são calculados a partir do momento causado por ventos que produzam uma pressão de 48.5 Kgf/m^2 e que actua no centro geométrico da área lateral exposta do navio de um dos lados. Para a explicação que se segue, vamos supor que o vento actua a bombordo e que causa um adornamento do navio para estibordo.

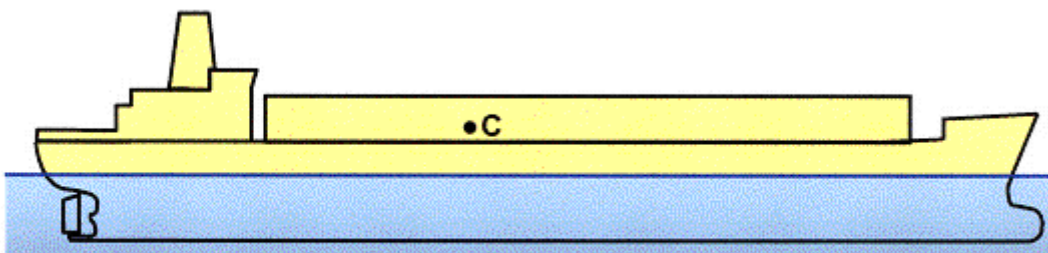


Fig. 12.2 – Centro geométrico da área lateral exposta do navio (C).

Se a área lateral exposta ao vento for $A \text{ (m}^2\text{)}$ então a força que actua em C devido ao vento estável, é dada por:

$$\text{Força do vento estável (tons f)} = \frac{(A \times 48.5)}{1000}$$

(divide-se por 1000 para converter Kgf em toneladas força).

Considere-se, agora a seguinte figura:

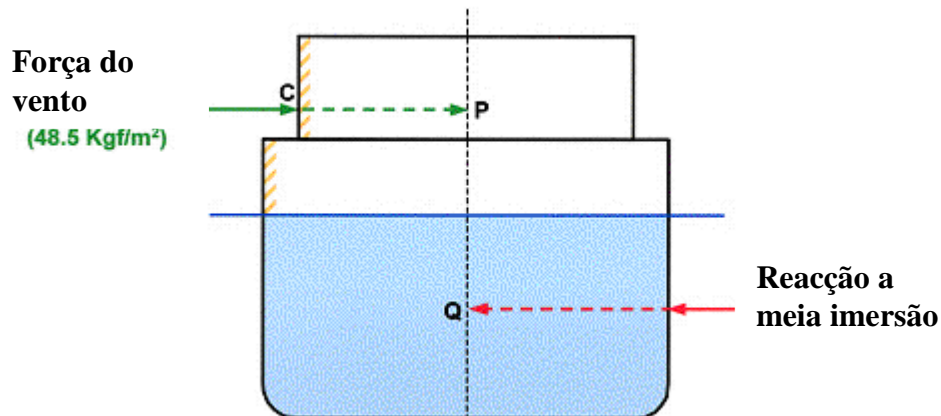


Fig. 12.3 – Binário de forças devido ao vento.
[Rhodes, Martin (2003)]

A força do vento estável de 48.5 Kgf/m^2 de pressão que actua em C é resistida por uma força igual e oposta a meio da imersão do navio, o que resulta no momento de adornamento causado por vento estável (momento inclinante):

$$\text{Mom. Inclinante vento estável (t.m)} = \frac{(A \times 48.5) \times PQ}{1000}$$

Este momento do vento estável é traçado no diagrama dos momentos endireitantes através de uma linha horizontal:

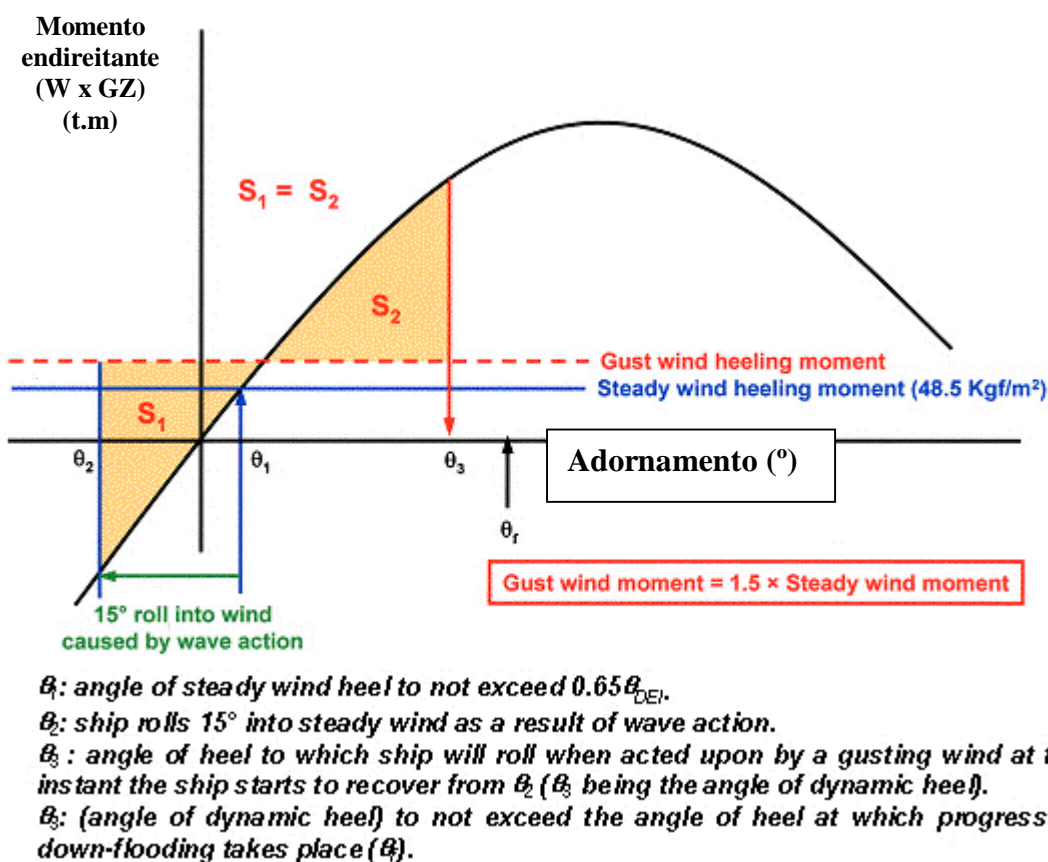


Fig. 12.4 – Diagrama dos momentos endireitantes e dos momentos inclinantes de vento estável e de vento de rajada.
[Rhodes, Martin (2003)]

O navio tende a adornar para estibordo. O ângulo de adornamento permanente devido ao vento estável é θ_1 , em que os momentos endireitante e o momento do vento são iguais (θ_{DEI} – Ângulo de imersão do convés (*angle of deck edge imersion*)).

$$\theta_1 \text{ não deve exceder } | 0.65 \times \theta_{DEI}$$

Devido ao movimento de balanço resultante das ondas marítimas assume-se que o navio adorna 15° (para bombordo), a partir do ângulo de adornamento permanente causado pelo vento, até ao ângulo θ_2 .

No instante em que o navio começa a recuperar é assumido que um vento “gusting” (vento de rajada) actua, e que é dado por:

$$\text{Mom. Incl. v. rajada (t.m)} = 1.5 \times \text{Mom. Incl. v. estável}$$

O navio adornará até θ_3 (ângulo de adornamento dinâmico), e só depois é que passará pela posição de direito. Este ângulo de adornamento dinâmico corresponde à posição do diagrama dos momentos endireitantes, em que a área S_1 é igual à área S_2 .

θ_3 – Ângulo de adornamento dinâmico, que não deve exceder o ângulo em que ocorre o alagamento progressivo (θ_f)

Na prática é difícil calcular o valor do ângulo de adornamento dinâmico (θ_3). Por exemplo vamos considerar a seguinte figura:

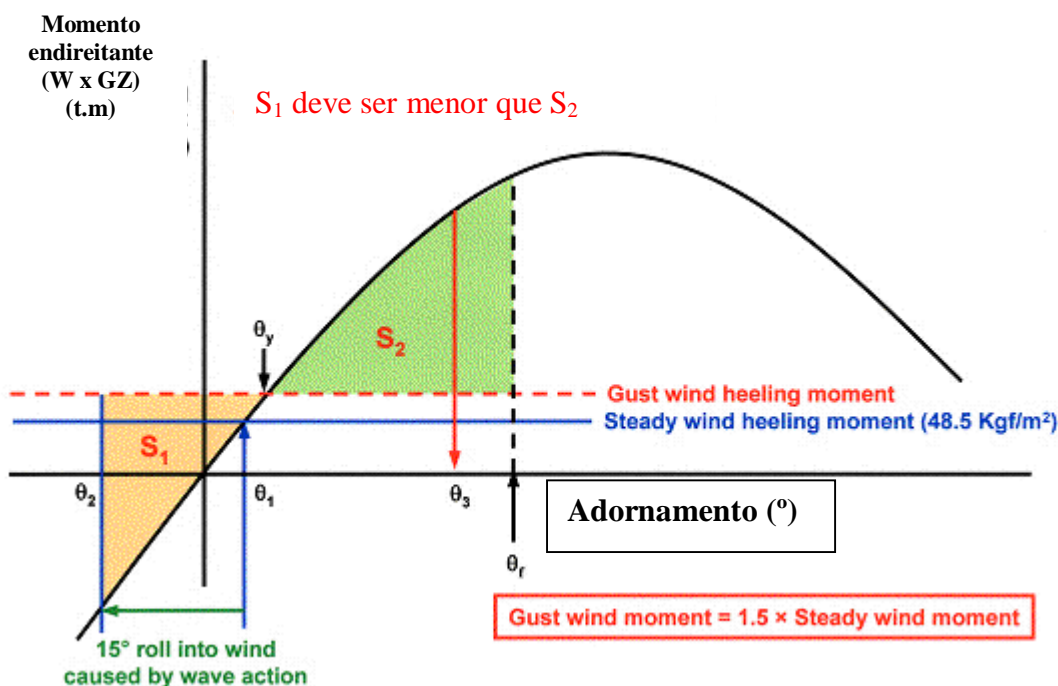


Fig. 12.5 – Esquema para o cálculo do ângulo de adornamento dinâmico.

[Rhodes, Martin (2003)]

O método a doptar é o seguinte:

- a) Calcular a área S_1 usando as regras de Simpson;
- b) Através das cartas hidrostáticas, determinar o ângulo de imersão progressiva (θ_f) para a condição de carregamento do navio;
- c) Calcular a área delimitada pela linha correspondente ao vento de rajada “gusting” e a curva dos momentos endireitantes, entre θ_y e θ_f , utilizando as regras de Simpson;
- d) Se fôr respeitado que a área S_1 é menor do que a área S_2 , o navio cumprirá as recomendações de segurança.

12.1.1- Unidades da pressão do vento, vento severo e “rolling criterion – (IMO)”

A unidade do Sistema Internacional de Unidades para a força é o Newton (N), que é definida como a força necessária para criar uma aceleração de 1m/s^2 numa massa de 1Kg. O peso expresso em Newtons é igual a:

$$\text{PESO (N)} = \text{MASSA (kg)} \times \text{ACELERAÇÃO (m/s}^2\text{)}$$

Assim a massa de um corpo de 50Kg tem um peso de: $50 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 490.5 \text{ N}$, onde 9.81 m/s^2 é a aceleração gravitica à superfície da terra, ou dito por outras palavras, a massa de 50Kg exercerá uma força de 490.5 N á superfície da terra.

A unidade do Sistema Internacional de Unidades para a pressão é o Pascal (Pa), e a pressão é dada por:

$$\text{PRESSÃO (Pa)} = \text{FORÇA (N)} / \text{ÁREA (m}^2\text{)}$$

A força constante de 48.5 Kgf por cada m^2 corresponde a uma pressão de $48.5 \text{ Kgf/m}^2 \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 476 \text{ Pa}$.

A “gusting” (rajada de vento) expressa em Pascals é de $1.5 \times 476 = 714 \text{ Pa}$.

O código IMO estabelece estes requisitos para o cálculo do vento para navios de carga ou de transporte de passageiros, com comprimento superior a 24 m. O mesmo código expressa os regulamentos em termos de bracos inclinantes em metros, que depois são

traçados sobre a curva de estabilidade transversal (curva GZ). Assim o braço inclinante (“*steady wind heeling*”), devido a vento estável, pode ser calculado da seguinte forma [Rhodes, Martin (2003)]:

:

$$I_{w1} \text{ (m)} = \frac{PAZ}{1000g\Delta}$$

Onde:

‘**P**’ corresponde à pressão do vento de 504 Pa;

‘**A**’ é a area lateral acima da linha de flutuação;

‘**Z**’ é a distância vertical desde o centro da area A até ao centro da área imersa, ou até um ponto a meia altura da imersão media (m) (é o mesmo que PQ);

‘**Δ**’ é o deslocamento (t), e;

‘**g**’ é a aceleração gravitica de 9.81 m/s².

O braço inclinante devido ao vento severo (I_{w2}) é dado por:

$$I_{w2} = 1.5 \times I_{w1}$$

O período de balanço transversal pode ser calculado, de uma forma expedita, por:

$$\text{Rolling period (T secs)} = \frac{2CB}{\sqrt{GM}}$$

Em que: $C = 0.373 + 0.023 (B/d) - 0.043 (L/100)$;

‘**B**’ é a boca do navio na linha de flutuação (m);

‘**d**’ é a imersão média do navio (m);

‘**L**’ é o comprimento longitudinal do navio, entre perpendiculares;

‘**GM**’ corresponde à altura metacêntrica corrigida para espelhos líquidos (m);

12.2- Deposição de gelo nas superestruturas

O livro da estabilidade de qualquer navio deve ter informações sobre a área onde é provável haver deposição de gelo, bem como indicar o efeito da formação de gelo nas áreas expostas do navio, no caso de exposição severa e exposição média.

A exposição severa contempla as seguintes condições:

- a) Latitude Norte de 66° 30' N entre a costa da Noruega e 10° W de Longitude;
- b) Latitude Norte de 63° N e entre 10° W e 28° W de longitude;
- c) Latitude norte de 45° N e entre a costa da América do Norte e 28° de Longitude;
- d) Norte da Europa, Norte da América e Continente Asiático fora dos limites da Longitude em (a), (b) e (c);
- e) Mar de Okhotsk, mar de Bering e Golfo da Tartária;
- f) A sul de 60° S.

A exposição severa de deposição de gelo assume que:

- a) Todas as superfícies horizontais expostas do navio contêm 30 Kg/m² de gelo;
- b) As superfícies verticais do navio contêm cerca de 15 Kg/m² de um dos lados do navio, acima da linha de água.

A exposição média contempla as seguintes condições:

- a) Áreas a Norte de 61° N, entre a costa da Noruega e os 28° W, e a sul das áreas de exposição severa;
- b) Em qualquer lugar em zonas de inverno sazonal mais severo.

A exposição média de deposição de gelo assume metade dos valores da exposição severa.

O centro de gravidade de cada área de formação de gelo tem que ser estimada de modo a poder-se calcular o momento resultante do peso do gelo.

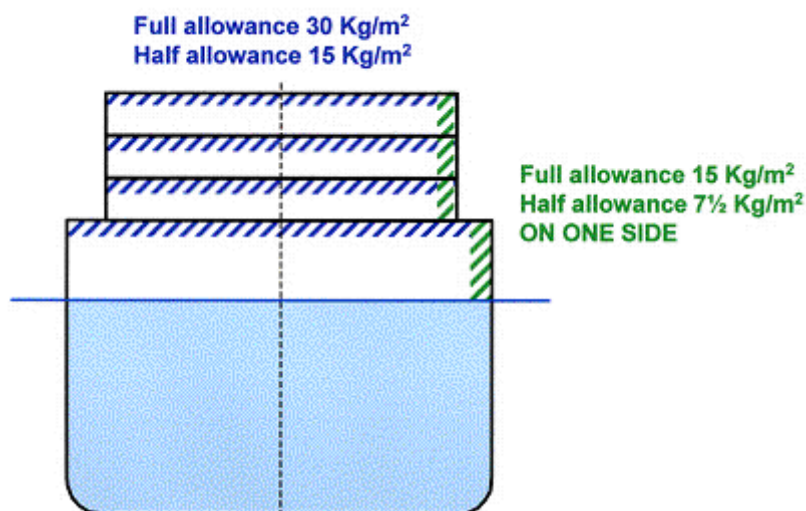


Fig. 12.6 – Máxima e média carga de gelo recomendada por unidade de área, nas superestruturas.
[Rhodes, Martin (2003)]

A deposição de gelo em recantos, escadas e equipamentos diversos no exterior é calculada como sendo cerca de 5% do gelo em superfícies verticais, e o momento resultante deste gelo, como cerca de 10% do momento causado pela deposição de gelo em superfícies verticais.

A deposição de gelo em superfícies horizontais e do convés provocam o aumento de KG e consequente decréscimo de GM.

A deposição de gelo em superfícies laterais num dos bordos acima da linha de flutuação provoca o adornamento permanente do navio.

A figura seguinte ilustra os efeitos da deposição de gelo na curva de estabilidade:

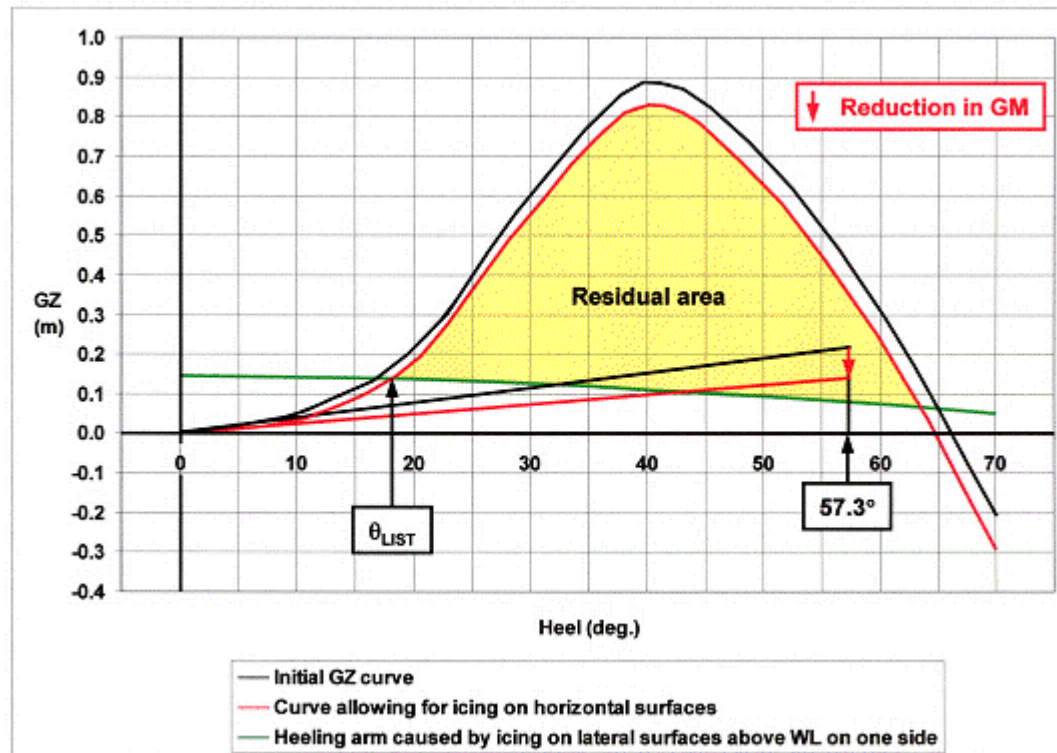


Fig. 12.7 – Efeitos da deposição de gelo na curva de estabilidade transversal.

[Rhodes, Martin (2003)]

Em suma, a deposição assimétrica de gelo origina:

- Redução da altura metacentrica GM;
- Redução dos valores dos braços endireitantes GZ ao longo da gama de estabilidade;
- Redução da estabilidade dinâmica, fazendo com que o navio se torne menos capaz de resistir ao adornamento causado por forças exteriores;
- Redução da gama de estabilidade, bem como do ângulo em que ocorre a imersão do costado devido ao aumento do deslocamento.

Ou seja, todos os parâmetros de estabilidade pioram!

13- BALANÇO EM ÁGUAS TRANQUILAS

As características que regulam o balanço são essencialmente:

- a) A altura metacêntrica GM;
- b) A distribuição de pesos no interior do navio e a sua localização relativamente ao eixo longitudinal do navio.

O período de balanço (T), em segundos, é o tempo que o navio demora a completar uma oscilação transversal.

A amplitude de balanço é normalmente dada em graus de inclinação.

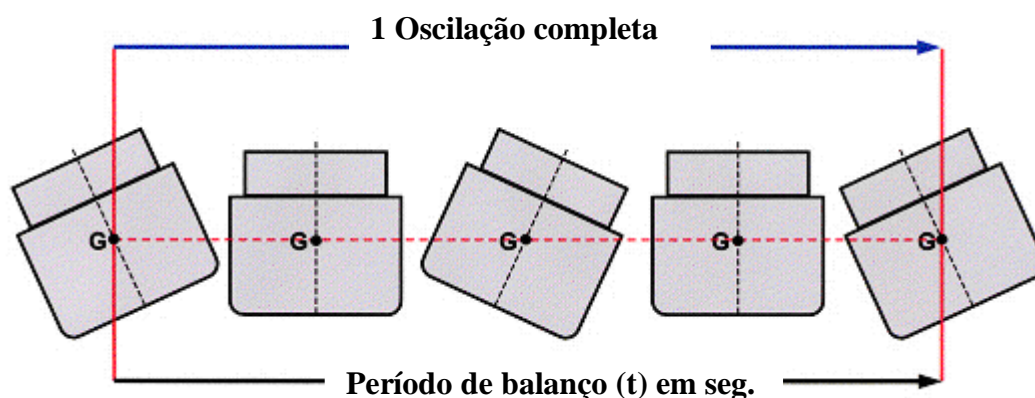


Fig. 13.1 – Movimento de balanço transversal.

Em termos ideais considera-se o balanço como uma oscilação livre não amortecida (sem atrito viscoso), pelo que a amplitude da oscilação mantém-se constante. Na realidade o movimento de balanço é uma oscilação amortecida, pelo que a amplitude (em graus) da oscilação é decrescente até se anular e o navio parar na posição de direito, em águas tranquilas.

No caso da oscilação ideal e não amortecida, o balanço pode ser tratado como um pêndulo ideal, e pela lei da conservação da energia mecânica, a energia total é igual à energia potencial nos extremos da oscilação, e à energia cinética no instante em que o navio passa pela posição de direito (ângulo de adornamento = 0°). Em qualquer posição intermédia no ciclo de balanço, a energia total é igual à soma das parcelas da energia potencial e da energia cinética, e a soma destas duas parcelas mantém-se constante (energia total é constante – princípio da conservação da Energia mecânica).

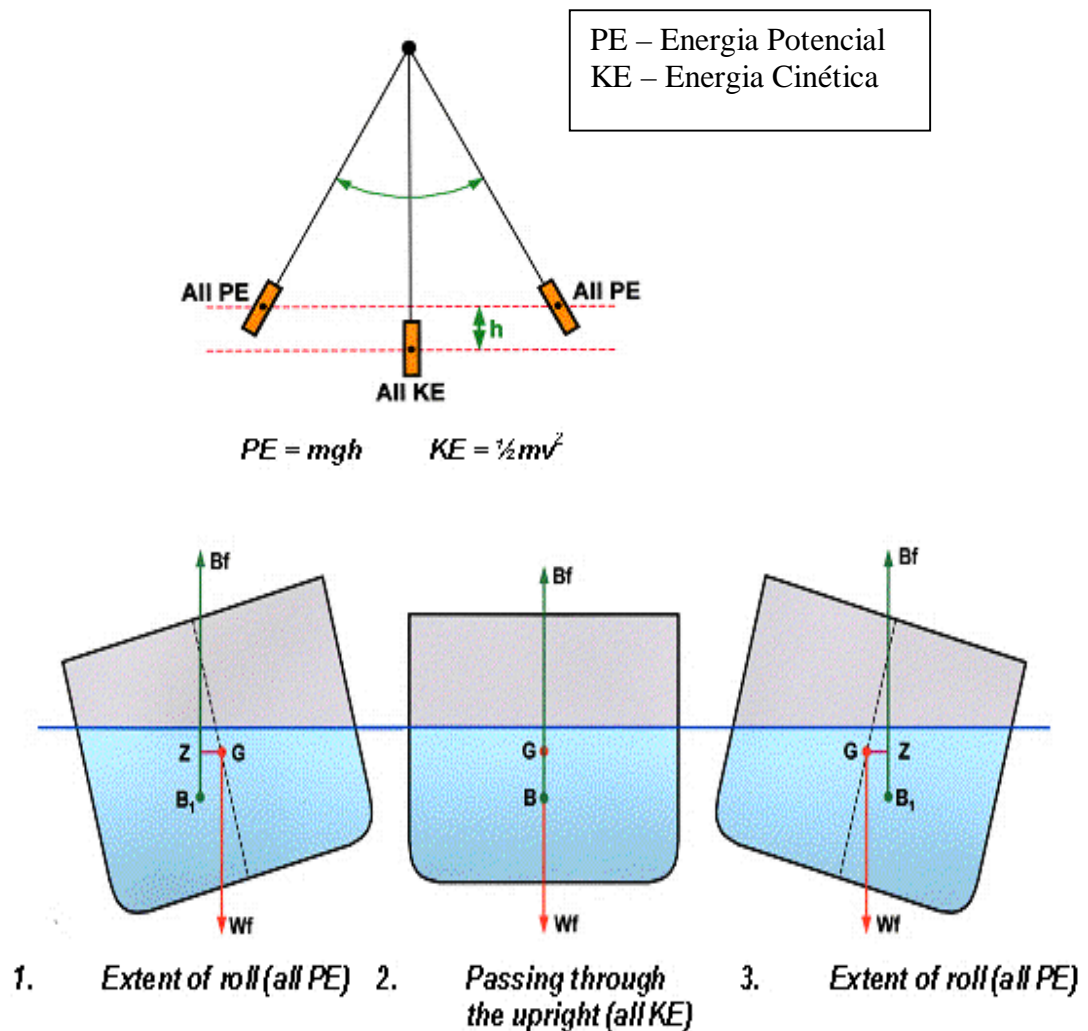


Fig. 13.2 – Oscilação ideal e não amortecida.
[Rhodes, Martin (2003)]

Nas posições extremas (1) e (3), o navio possui a energia potencial máxima, e que é igual à área abaixo da curva dos momentos endireitantes para o mesmo ângulo de adornamento.

Quando o navio passa pela posição de direito (2) o braço endireitante GZ e consequentemente o momento endireitante são nulos, bem como a energia potencial. No entanto o navio passará com a máxima velocidade de oscilação, ou seja com a máxima energia cinética.

O periodo de oscilação (T) é calculado aproximadamente pela seguinte fórmula [Soares, Guedes (1988)]:

$$T \text{ (secs)} = 2\pi \sqrt{\frac{I}{W \times g \times GM}}$$

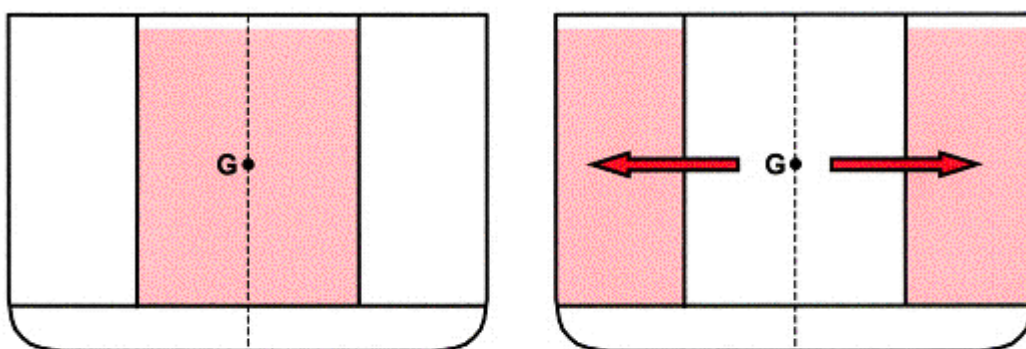
em que I é o momento de inércia da massa do navio relativamente ao eixo longitudinal de oscilação (e que passa pelo centro de gravidade G), W é o deslocamento do navio em toneladas, g é a aceleração gravitica terrestre à superfície (9.81 m/s^2) e GM é a altura metacêntrica efectiva do navio. O valor de I é calculado pela fórmula:

$$I = \sum wr^2$$

em que w é o peso individual de cada componente da estrutura e r é a distância de cada componente ao eixo longitudinal de balanço, que se assume que passa por G.

A fórmula anterior pode ser escrita como $I = Wk^2$ em que W é o deslocamento do navio e K é o raio de giração.

O raio de giração pode ser interpretado como a distância ao centro de gravidade (ou ao eixo longitudinal de balanço) em que o peso total do navio estaria concentrado de modo a obter-se o mesmo momento de inércia.



O movimento de pesos para distâncias maiores ao centro do eixo de balanço (e que passa por G), aumenta o raio de giração (K) e aumenta o período de balanço (T).

Fig. 13.3 – Forma de aumentar o raio de giração K do navio.

Ou seja, o raio de giração de um navio altera quando se altera a distribuição dos pesos a bordo.

A fórmula do período de balanço pode então ser escrita da seguinte forma:

$$T \text{ (secs)} = 2\pi \sqrt{\frac{Wk^2}{W \times g \times GM}}$$

O que simplifcadamente resulta em:

$$T \text{ (secs)} = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \times GM}}$$

Esta fórmula é perfeitamente correcta para pequenos ângulos de adornamento, onde a fórmula $GZ = GM \times \sin \theta$ é válida.

A fórmula anterior mostra claramente que para um valor constante de I (ou K) o período de balanço T é inversamente proporcional à raiz quadrada de GM (GM positivo), isto é: à medida que a altura metcêntrica GM aumenta o período de balanço T diminui e vice-versa. A fórmula também mostra que o período de balanço é directamente proporcional ao raio de giração K: se K aumentar o T aumenta.

Uma comparação interessante é o equilíbrio no trapézio de circo, em que se uma pessoa utilizar uma vara comprida (aumenta o raio de giração), o “período de balanço” aumenta, e a pessoa tem mais estabilidade no equilíbrio.



Fig. 13.4 - Uma vara comprida permite melhor equilíbrio.

Qualquer alteração na distribuição de pesos que provoque alteração de GM ou K (e de I) provoca uma alteração no período de balanço T. Como regra geral, o movimento vertical de pesos provoca maior efeito no período de balanço, do que a movimentação igual na horizontal, para pesos do mesmo valor.

13.1- Determinação da altura metacêntrica GM através da medição do período de balanço T.

A fórmula seguinte permite calcular a altura metacêntrica através do período de balanço, sabendo-se a boca do navio (esta fórmula é apropriada para navios de comprimento superior a 70 metros) [Rhodes, Martin (2003)] :

$$T \text{ (secs)} = \frac{f \times \text{Beam}}{\sqrt{GM}}$$

Em que “f “ **é conhecido como coeficiente de balanço, e pode tomar valores entre 0.60 e 0.88 consoante o tipo de navio.**

Quando um navio oscila em águas tranquilas, o casco submerso está sujeito à fricção com a água (que resulta no movimento da própria água). O resultado é uma oscilação amortecida, em que a fórmula:

$$T \text{ (secs)} = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \times GM}}$$

mantém-se correcta.

O período de balanço do navio é independente da amplitude da oscilação enquanto o movimento fôr estável e contínuo.

Isto significa que por exemplo para um navio com um período de balanço de 10 segundos com um balanço inicial entre os 5° a Bombordo até aos 5° de Estibordo, o período de balanço será o mesmo (10 segundos), se o navio adornar entre os 20° a BB e os 20° a EB.

Obviamente que quanto maior fôr a amplitude de balanço, mais rápido será o movimento de oscilação do navio (o período de balanço mantém-se constante, para as mesmas condições de carga).

14- BALANÇO DEVIDO ÀS ONDAS

14.1- Teoria das ondas

As ondas marítimas provocadas, principalmente pela acção do vento, são essencialmente de forma trocoidal.

Por exemplo, um ponto fixo marcado no pneu de uma roda de bicicleta, traça uma curva trocoidal quando a roda é posta em movimento, vista por um observador imóvel, como ilustrado na figura seguinte.

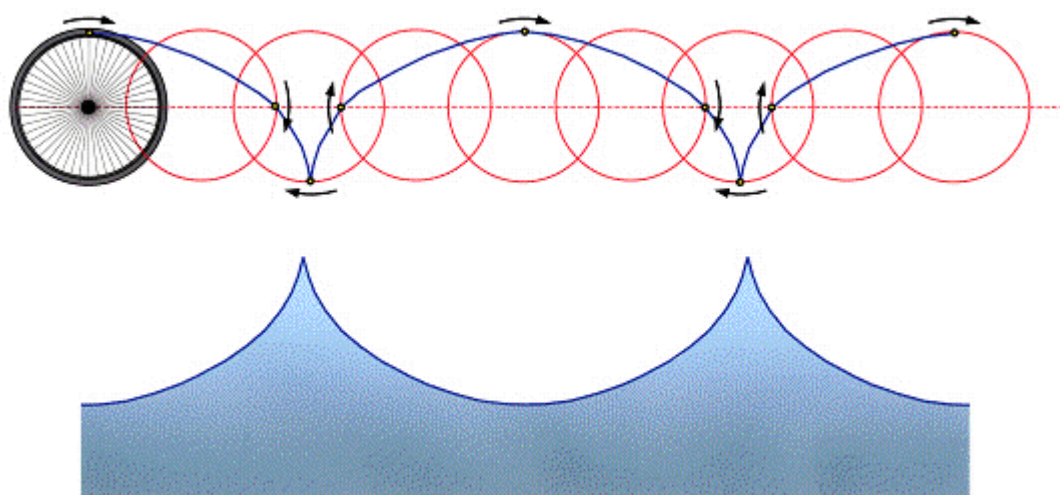


Fig. 14.1 – Forma trocoidal das ondas.

Quando a onda passa em zonas de grande profundidade marítima, não existe deslocamento virtual da água; as partículas de água movem-se quase num patamar circular fechado. Nas cristas das ondas, as partículas de água movem-se no mesmo sentido e direcção da propagação das ondas, enquanto que abaixo dessa camada, as partículas movem-se em sentido contrário de rotação. Na superfície o diâmetro orbital corresponde à altura da onda, mas o diâmetro decresce exponencialmente com o aumento da profundidade até à profundidade igual a metade do comprimento de onda. A partir daí o diâmetro orbital é negligenciável e não existe virtualmente qualquer deslocamento das partículas de água. Assim se explica porque é que os submarinos têm que imergir até cerca de 150 metros de profundidade para evitar os efeitos de uma tempestade severa no mar.

O movimento de um navio no mar com ondulação é também circular na medida em que segue o movimento orbital das partículas de água (ver a figura seguinte):

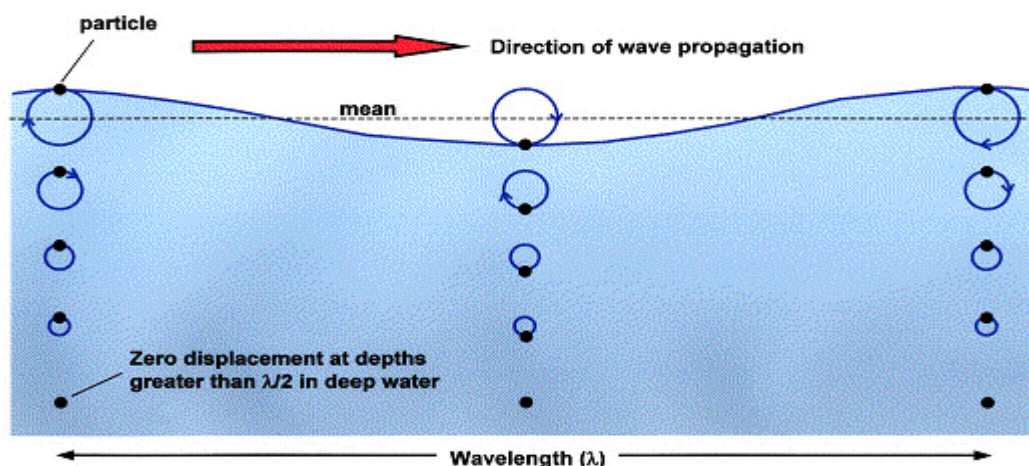


Fig. 14.2 – Movimento orbital das partículas de água.

Quando está na crista da onda, o navio move-se no mesmo sentido e direcção de propagação da onda, e quando está na cava da onda move-se em sentido contrário. A seguir à crista da onda o navio tende a levantar (diminui a imersão), e a seguir à cava da onda o navio tende a imergir um pouco (aumenta a imersão).

Em mar aberto temos que:

$$\lambda = 0,17.V^2 = 1,56.T^2$$

em que:

‘ λ ’ é o comprimento de onda em metros;

‘ V ’ é a velocidade de propagação da onda em nós, e;

‘ T ’ corresponde ao período da onda em segundos.

14.2- Movimento de balanço devido às ondas

Este tipo de movimento de balanço dos navios resulta das seguintes condições:

- a) Da oscilação devido ao período de balanço em águas tranquilas;
- b) Da oscilação devido ao período das ondas.

Quando o navio está sujeito à acção ascendente da onda, depois da crista, e no caso de ondas regulares com um periodo razoável, o navio eventualmente terá um movimento de balanço com o mesmo periodo das ondas. No entanto, se as ondas possuírem um periodo variável, como é a maior parte dos casos, o navio tenderá a ter um movimento com o seu periodo natural de balanço. A amplitude do balanço do navio (em termos de ângulo máximo de adorno) dependerá do desfaseamento de fase entre as condições (a) e (b) anteriormente descritas, e porque o periodo de oscilação do navio em águas tranquilas é função da boca e da altura metacêntrica GM, a amplitude dependerá assim da condição de estabilidade actual [Bhattacharyya, Rameswar (1978)].

Um navio largo e baixo tende a adormar depois da crista da onda (alinhamento do convés com o declive da onda, devido ao grande momento inclinante na posição de direito. Qualquer navio com uma grande boca, ou com grande altura metacêntrica GM, balança vagarosamente, e tem um periodo natural de balanço mais pequeno do que o periodo da onda. Nestas condições a velocidade angular do balanço será excessivo e poderá causar tensões de fadiga apreciáveis:

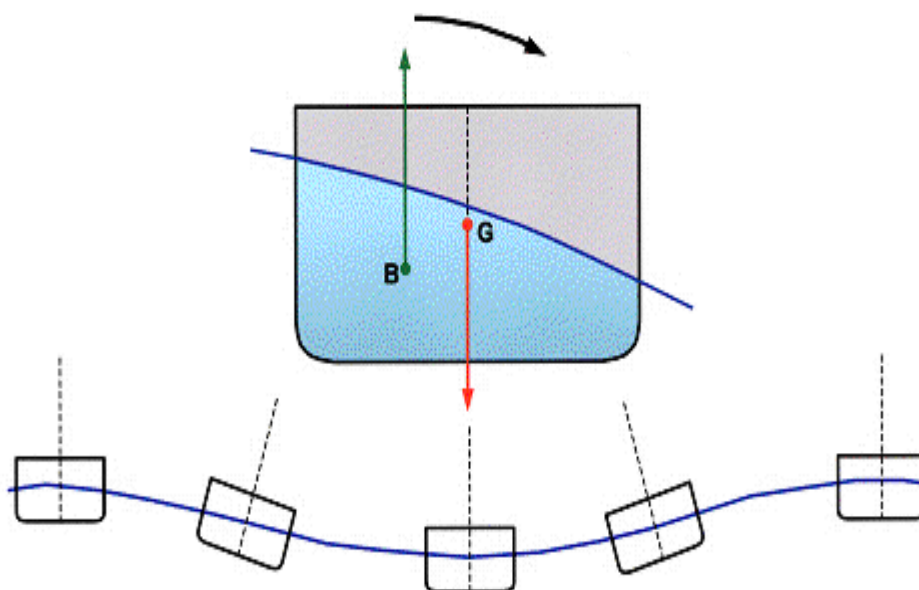


Fig. 14.3 – Comportamento do navio com grande boca.
[Rhodes, Martin (2003)]

O oposto, ou seja, para um navio com boca pequena ou com pequena altura metacêntrica GM, tende a adornar mesmo na crista da onda, e é uma característica de qualquer navio com um período natural de balanço maior do que o período da onda. O navio adornará até ângulos moderados e de uma forma relativamente lenta.

Assim haverá uma estabilidade adequada, para fazer face a condições climáticas adversas, ou seja, esta é a condição desejável (como é o caso dos navios de guerra, que possuem a estabilidade adequada para suportar as piores condições de mar):

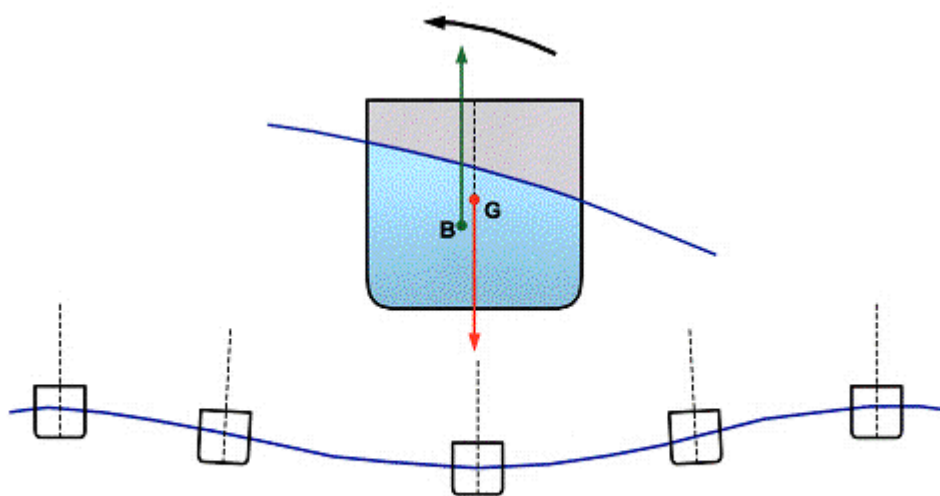


Fig. 14.4 – Comportamento do navio com pequena boca.
[Rhodes, Martin (2003)]

O sincronismo corresponde à condição em que o período natural de balanço do navio é igual ao período das ondas, o que faz aumentar a amplitude de balanço de aproximadamente “ $\pi/2$ x declive da onda” entre sucessivas cristas ou cavas. Neste caso um declive de onda de cerca de 4° causa um aumento do ângulo de adornamento de cerca de 6° , ou seja, de 12° de oscilação entre sucessivas cristas ou cavas de onda [Rawson, K.J. (1984)].

O sincronismo não é desejável, mas se acontecer, é menos perigoso se o navio tiver um longo período natural de balanço.

O sincronismo pode ser evitado através de:

- a) Alteração de rumo do navio;
- b) Alteração de velocidade do navio;

- c) Alteração do período natural de balanço através da alteração de: altura metacêntrica GM e/ou raio de giração do navio.

O sincronismo é na maior parte das vezes temporário, e normalmente acontece à entrada ou saída de portos, e é imediatamente reconhecido através do balanço excessivo para as condições climatéricas que se fazem sentir nesse momento.

O recorte natural na orla marítima, bem como os fundos baixos, rochas e bancos de areia na vizinhança de portos provocam refacção das ondas, o que faz com que os navios estejam sujeitos a ondas de diferentes direcções e períodos, em pouco tempo, aumentando assim a hipótese de surgir o sincronismo de períodos (equivalente ao fenómeno da ressonância nos sistemas vibratórios).

14.3- Métodos para minimizar o movimento de balanço no mar.

Os métodos usuais para minimizar o movimento de balanço no mar dividem-se em duas categorias: sistemas passivos e sistemas activos.

Estes sistemas assentam na utilização de tanques ou estabilizadores de balanço (“barbatanas” hidrodinâmicas).

14.3.1- Sistemas passivos

Existem dois tipos principais de sistemas passivos: os porões de lastro de quilha e os tanques estabilizadores.

Os porões de lastro de quilha providenciam o melhor método para a redução da amplitude de balanço quando o navio opera em velocidade. Idealmente estes tanques deveriam ser cuidadosamente calculados e montados em todos os navios. Estes tanques devem ser montados simetricamente à linha de meio-navio e na vizinhança da quilha do navio (o centro de gravidade G diminui de altura). Com este método a amplitude de balanço pode ser reduzida em mais de 35%. Este tipo de tanques é mais adequado em navios de grande boca e grande área livre junto à quilha.

Os tanques estabilizadores reduzem o balanço do navio através do movimento de água de um bordo para o outro do navio, por intermédio do efeito simples da gravidade.

As forças estabilizadoras em jogo neste tipo de tanques com efeito de espelhos líquidos são uma combinação da massa de líquido em movimento e das forças de aceleração horizontal geradas com o movimento da água.

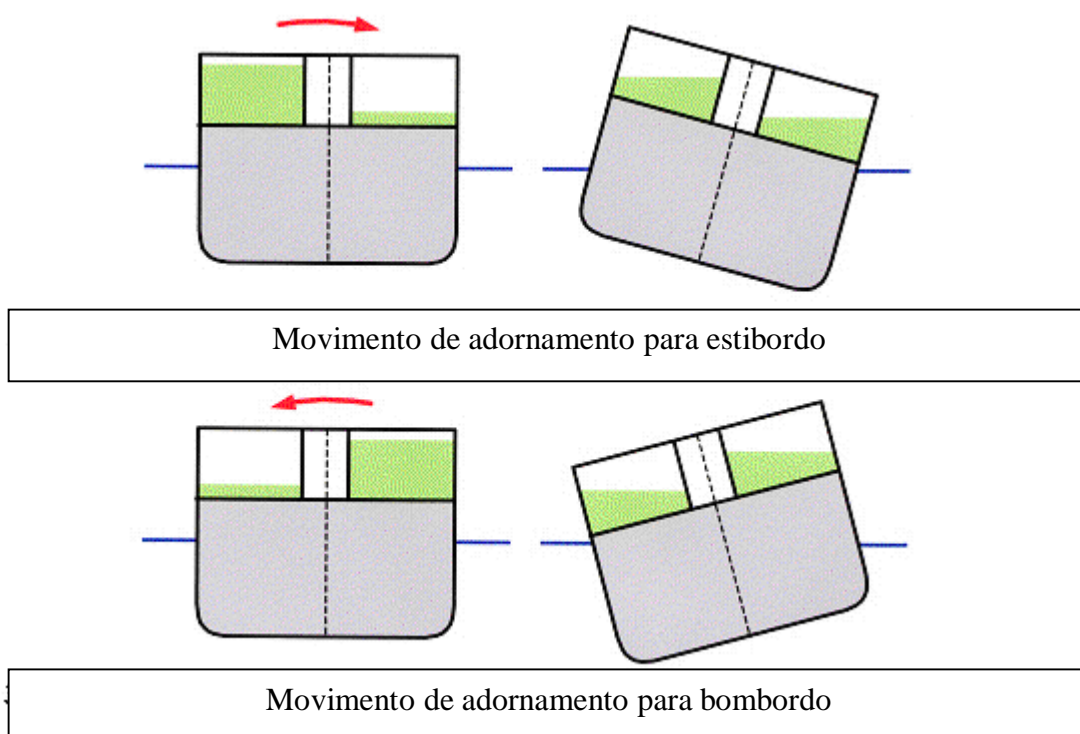
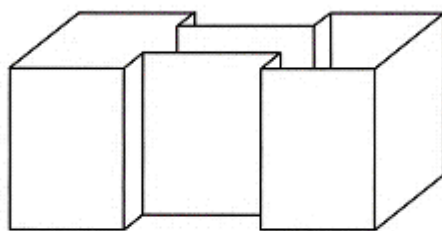


Fig. 14.5 – Tanques estabilizadores passivos.

O momento estabilizador devido à distribuição assimétrica de líquido pode ser aumentado até três vezes pela acção das ondas de líquido no interior dos tanques. Um nível correcto de água no interior dos tanques pode providenciar um movimento das ondas no interior desfasadas de 90° do movimento de balanço do navio. Deve haver uma diferença máxima nas quantidades de água nos dois lados dos tanques quando o navio passa pela posição de direito, e quantidades iguais de água quando o navio está no máximo de adornamento (ver a figura anterior).

Este tipo de tanques tem normalmente a seguinte forma:



Flume tank

Fig. 14.6 – Forma dos tanques estabilizadores.

O período da onda interna de determinado tanque estabilizador pode ser calculado para determinado navio, e ainda na fase de projecto, actuando para isso nas dimensões dos tanques como por exemplo no comprimento longitudinal da câmara central. Em operação, o nível óptimo de água pode ser ajustado para alturas metacêntricas GM diferentes. O período da onda interna do tanque estabilizador é também calculado pela seguinte fórmula:

$$T \text{ (secs)} = \frac{2\pi k}{\sqrt{g \times GM}}$$

e que é igual à fórmula utilizada para o período de balanço em águas tranquilas.

É importante realçar que o efeito de espelhos líquidos nestes tanques é tido em conta aquando do cálculo do KG efectivo e portanto dos valores de GZ.

14.3.2- Sistemas activos

Este tipo de sistemas inclui tanques estabilizadores ou “barbatanas” hidrodinâmicas.

Os tanques estabilizadores activos direccionam a água de um lado para o outro. São dois tanques, um em cada lado do navio em que o nível de água é controlado por uma ou mais bombas que são activadas por um sistema de controlo giroscópio. Os tipos de sistemas activos mais utilizados são os seguintes:

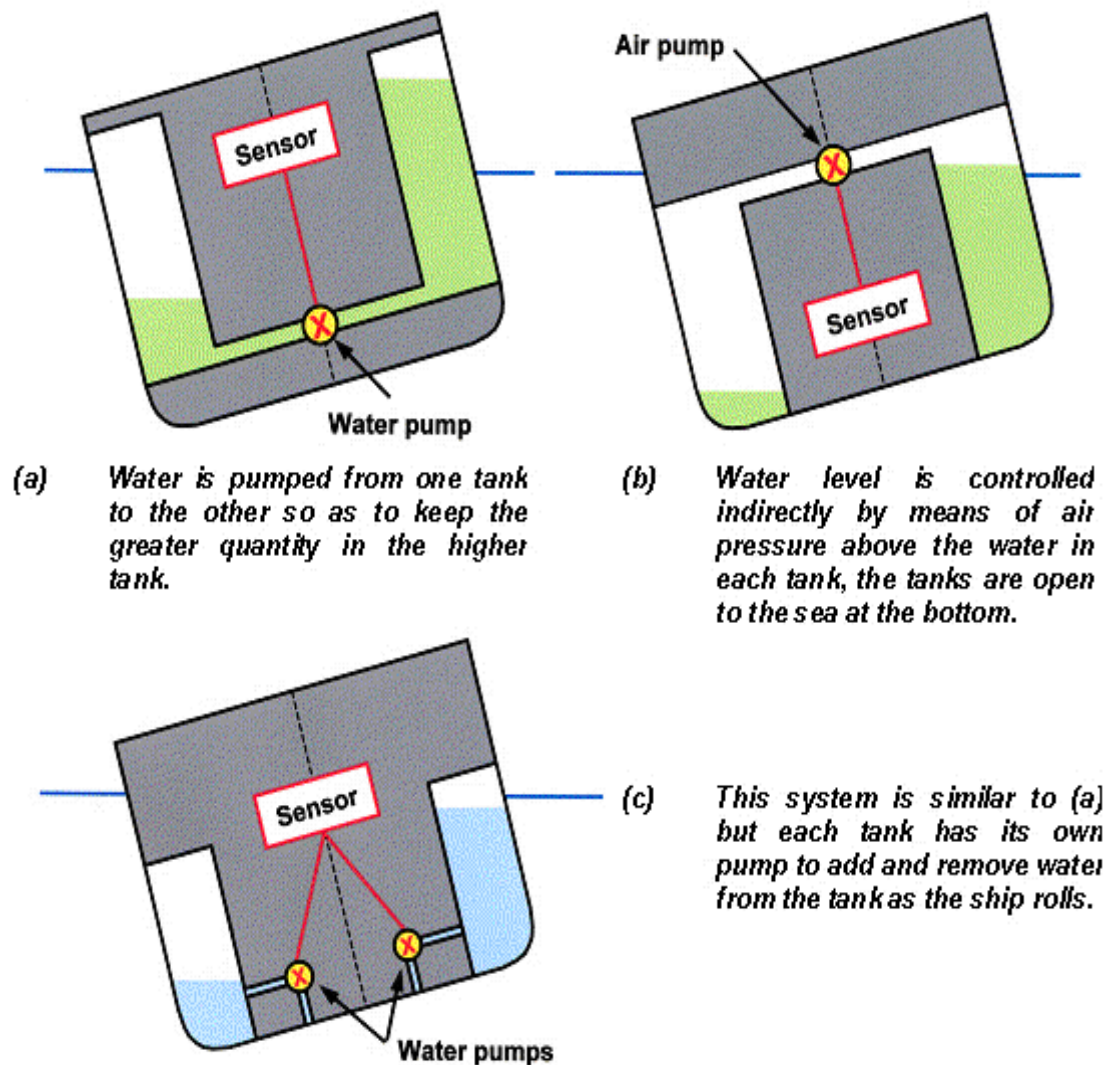


Fig. 14.7 – Tanques estabilizadores activos.
[Rhodes, Martin (2003)]

O objectivo é colocar no tanque do bordo contrário ao adornamento, maior quantidade de água de modo a contrariar esse adornamento.

Os sistemas com “barbatanas” hidrodinâmicas, consistem em secções na forma de aerofoil que são montadas junto à curvatura inferior do casco, em ambos os bordos, e que possuem movimento de rotação em redor de um eixo transversal ao eixo longitudinal do navio.

Quando a secção posterior da pá é colocada para baixo, o fluxo de água ao passar pelo estabilizador, exerce uma força para baixo, e ao mesmo tempo no lado oposto surge uma força para cima, e vice-versa.

Outra alternativa é montar estabilizadores com movimento parcialmente angular, e que se movem para cima e para baixo de modo a contrariar o balanço do navio.

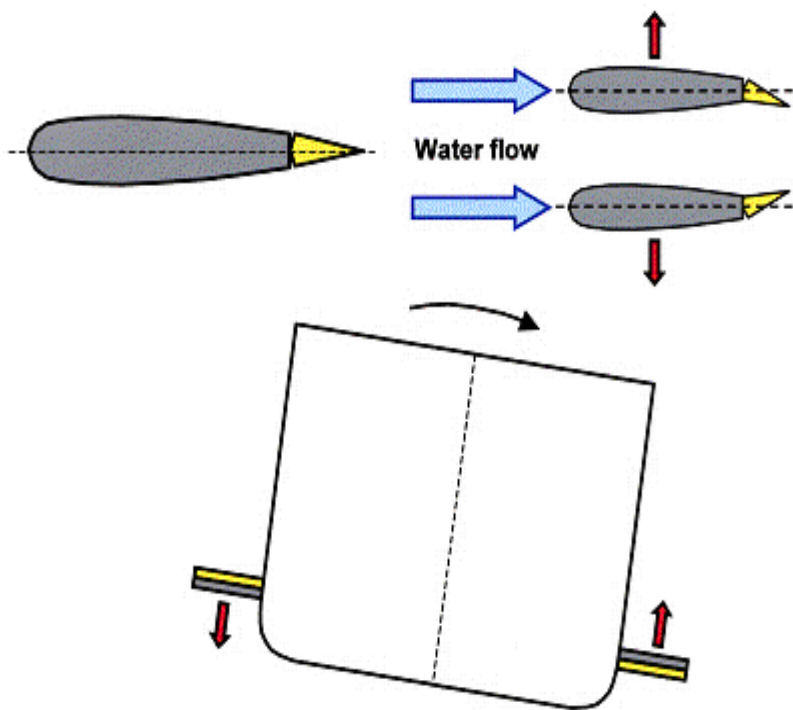


Fig. 14.8 – Estabilizadores hidrodinâmicos com movimento angular.
[Rhodes, Martin (2003)]

O movimento de balanço do navio é medido por um sistema de controlo interno giroscópico, e que actua hidráulicamente em engrenagens de modo a aplicar a inclinação óptima para contrariar o balanço. Este tipo de sistemas é bastante eficaz para maiores velocidades, e ineficazes com o navio parado.

15- MOVIMENTO ANGULAR ACELERADO

15.1- Princípios Gerais

Se um corpo rígido possui um movimento de rotação acelerado, a aceleração de qualquer partícula desse corpo a uma distância, r , perpendicular ao eixo de rotação tem duas componentes:

1. $r \alpha$, na direcção da velocidade instantânea;
2. $r \omega^2$, dirigida para o eixo de rotação.

Onde a velocidade angular instantânea é:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\phi}{dt^2}$$

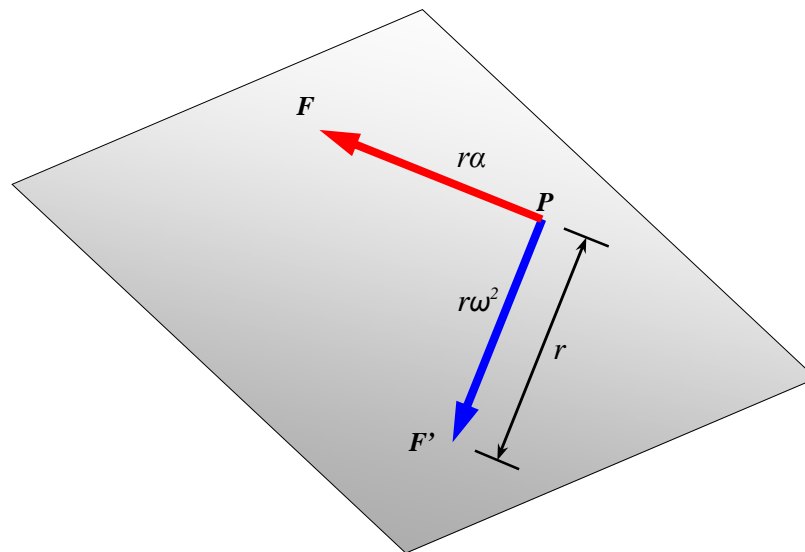


Fig. 15.1 - Componentes da aceleração de uma partícula animada de Movimento de Rotação Acelerado.

Na figura anterior estão representadas as forças que actuam na partícula P ; as setas indicam a direcção das forças. São elas:

$$F = \text{massa} \times \text{aceleração} = mr\alpha$$

$$F' = \text{massa} \times \text{aceleração} = mr\omega^2$$

Se considerarmos um corpo composto por várias partículas, torna-se claro que a força resultante, em cada partícula individual, possui todas as direcções paralelas ao plano de rotação.

É portanto, insignificante somar todas as forças, contudo a contribuição de cada partícula deve ser somada ao efeito rotacional total do corpo. Adiciona-se, portanto, os momentos das forças relativamente ao eixo de rotação.

O momento total de todas as forças, em torno do eixo de rotação é:

$$\begin{aligned}\sum F_i r_i &= \sum (m_i r_i^2) \alpha \\ &= \sum (m_i r_i^2) \frac{d^2 \phi}{dt^2} \\ &= I \frac{d^2 \phi}{dt^2}\end{aligned}$$

Onde I é o momento de inércia do corpo em torno do eixo de rotação, isto é $\Sigma(m_i r_i^2)$.

O valor de $\Sigma(m_i r_i^2)$ depende da distribuição da massa no corpo e do eixo de rotação, e designa-se por **Momento de Inércia** de um corpo relativamente a um eixo de rotação determinado. Deve ser lembrado, que apesar do valor de massa total de um corpo, $M = \Sigma m_i$, ser um valor único e característico de cada corpo, o momento de inércia pode ter diferentes valores, dependendo do eixo de referência.

Por outras palavras, podemos dizer que não existe nada que se possa chamar de momento de inércia de um corpo, mas sim que existem diversos momentos, referidos aos mais diversos eixos que podem ser particularizados.

No caso de um navio temos o momento de inércia do navio em torno do eixo dos xx , para o balanço, o momento de inércia do mesmo navio em torno do eixo dos yy , para o cabeceio e ainda o momento de inércia em torno do eixo dos zz , para a guinada.

Todos estes momentos terão valores necessariamente diferentes entre eles. Agora, se I é o momento de inércia em torno de um dado eixo de um corpo com massa M , uma distância k é definida pela equação dimensionalmente homogênea:

$$I = Mk^2$$

Onde k corresponde ao **Raio de Giração** de um corpo relativamente a um eixo de rotação determinado. Assim sendo, existem raios de giração para os três tipos de movimentos rotacionais de um navio: balanço, cabeceio e guinada. Para o presente trabalho apenas o movimento de balanço interessa, uma vez que os outros dois graus de liberdade rotacionais não serão alvo de estudo. Então, se tivermos um determinado raio de giração, o momento de inércia em torno de um eixo, é obtido pela relação:

$$I = Wk^2$$

Na prática, o raio de giração de um navio em relação a um eixo é obtido considerando o peso total do navio, ou deslocamento do navio, como a soma de muitos pesos menores, adicionando posteriormente o produto de cada valor de peso pelo quadrado da distância a um determinado eixo, isto é:

$$k^2 = \frac{\sum (w_i r_i^2)}{W}$$

Onde w_i é o peso do i -ésimo elemento, r_i é a distância do i -ésimo elemento ao eixo de rotação e W é o deslocamento do navio.

15.2- Prova de Suspensão

15.2.1- Determinação do Centro de Gravidade

Com a finalidade de determinar o centro de gravidade, o modelo do navio (utilizado nas experiências) foi suspenso como mostra a figura seguinte.

Ao suspender o modelo, este permanece em equilíbrio com uma determinada inclinação, ϕ , devido ao ponto de suspensão, H , chamado ponto *pivot*, estar deslocado relativamente ao ponto de mediania do modelo, L .

O modelo, uma vez em equilíbrio, tem o seu centro de gravidade, situado na linha de mediania, alinhado verticalmente com o ponto de suspensão, H .

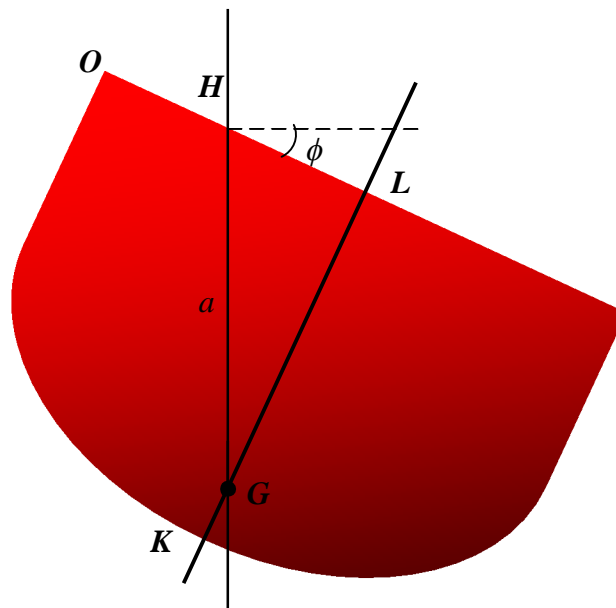


Fig. 15.2 - Determinação do Centro de Gravidade através da Prova de Suspensão.

Sabendo a distância \overline{HL} através da expressão:

$$\overline{HL} = \frac{B}{2} - HO$$

(B = boca do modelo do navio)

e medindo o ângulo ϕ , estabelece-se a seguinte relação trigonométrica:

$$\overline{GL} = \overline{HL} \tan(90^\circ - \phi)$$

$$\therefore \overline{KG} = \overline{KL} - \overline{GL}$$

Desta forma é possível determinar a posição vertical do Centro de Gravidade, do modelo, sendo mais um método para aferir a sua localização.

16- MOVIMENTO DE BALANÇO DOS NAVIOS

16.1- Equação do Movimento

Como o balanço é um movimento angular, deve-se referir em momentos e não em forças que actuam no movimento. Os momentos que actuam no movimento são:

- Momento de Inércia.
- Momento de Amortecimento.
- Momento de Restituição.
- Momento de Excitação.

A equação que define o movimento para o balanço é expressa por:

$$x \frac{d^2 \phi}{dt^2} + y \frac{d\phi}{dt} + z\phi = M_0 \cos \omega_e t$$

Identificando os momentos que constituem a equação:

$$\diamond \text{Momento de Inércia} = x \frac{d^2 \phi}{dt^2}$$

Onde x é o coeficiente do momento de inércia da massa virtual e $d^2 \phi / dt^2$ a aceleração angular no movimento de balanço.

$$\diamond \text{Momento de Amortecimento} = y \frac{d\phi}{dt}$$

Onde y é o coeficiente do momento de amortecimento e $d\phi/dt$ a velocidade angular. Para simplificação considera-se o momento de amortecimento linearmente proporcional à velocidade angular.

♦ *Momento de Restituição* = $z\phi$

Onde z é o coeficiente do momento de restituição e ϕ o deslocamento angular para o balanço.

♦ *Momento de Excitação* = $M_0 \cos \omega_e t$

O momento de excitação depende da frequência de encontro das ondas, ω_e .

Depois de determinados todos os coeficientes da equação, o movimento de balanço estará definido, sendo possível determinar as características do movimento [Bhattacharyya, Rameswar (1978)].

No Anexo B estão definidas as equações bases para o estudo de movimentos oscilatórios amortecidos livres e forçados. Foi com base nestas equações matemáticas que se desenvolveu grande parte do estudo deste trabalho.

As forças de amortecimento que actuam num navio durante o seu movimento de balanço devem-se à combinação da actuação dos seguintes factores:

- a) Ondas geradas pelo movimento do navio;
- b) Atrito nas obras vivas do casco ou vórtices;
- c) Robaletes ou apêndices;
- d) Resistência entre o navio e o ar;
- e) Dissipação de energia através da geração de calor durante o movimento de balanço;
- f) Tensão superficial.

Os efeitos devidos às causas a), b) e c) são significantes ao passo que as restantes causas são consideradas pequenas.

16.2 - Balanço transversal em águas tranquilas (movimento amortecido livre)

Considerando um movimento sinusoidal amortecido como modelação para um teste de excitação de balanço, verifica-se uma relação entre os extremos relativos, evidenciada pela função envolvente exponencial negativa. Esta relação irá permitir a determinação experimental do coeficiente de amortecimento.

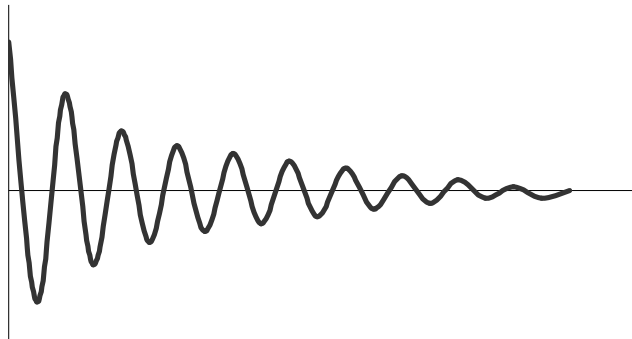


Fig. 16.1 - Curva sinusoidal amortecida.

A equação do movimento para o balanço em águas tranquilas é definida por:

$$x \frac{d^2 \phi}{dt^2} + y \frac{d\phi}{dt} + z\phi = 0$$

A equação do movimento em águas tranquilas é semelhante à apresentada no início do capítulo, mas sem o momento de excitação. O movimento em águas tranquilas é apenas constituído pelas componentes de inércia, amortecimento e restituição, correspondendo a um sistema massa, mola e amortecedor.

No caso dos navios e inserindo na equação as expressões para x , y e z temos:

$$I'_{xx} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + y \frac{d\phi}{dt} + W \overline{GM} \phi = 0$$

Tal que:

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + 2\nu \frac{d\phi}{dt} + \omega_a^2 \phi = 0$$

onde

$$2\nu = \frac{y}{x} = \frac{y}{I'_{xx}}$$

$$\omega_a^2 = \frac{z}{x} = \frac{W \cdot g \cdot \overline{GM}}{I'_{xx}}$$

e

$$T_a = \frac{2\pi}{\omega_a} = 2\pi \sqrt{\frac{I'_{xx}}{W \cdot g \cdot \overline{GM}}}$$

onde T_a é o período com amortecimento.

.Verifica-se que o período aumenta com o amortecimento, contudo, este aumento é muito pequeno visto que o amortecimento é muito pequeno no movimento de balanço.

16.3- Estabilização do Movimento

16.3.1- Introdução

Para reduzir o movimento de balanço de um navio no mar, é frequente usar-se estabilizadores de movimento. Estes podem reduzir consideravelmente as amplitudes e as acelerações dos movimentos sentidos pelos navios, bem como os efeitos dinâmicos associados. De todos os movimentos que um navio pode sentir (arfagem, cabeceio, balanço, etc.) apenas se consegue reduzir eficazmente os efeitos do balanço.

Usando como referência a Equação do Movimento, é possível verificar que existem três modos diferentes de reduzir o movimento oscilatório sentido por um navio, e que são:

- O aumento do amortecimento;
- Redução da frequência de oscilação natural do navio, ω_n ;
- Redução directa da força ou do momento de excitação.

16.3.2- Estabilização do Balanço

Tal como foi mencionado anteriormente, do ponto de vista da estabilização do movimento, o balanço, é o movimento que mais facilmente se consegue controlar, desde que as forças e os momentos envolvidos neste movimento não sejam muito grandes.

Existem vários dispositivos para estabilizar o balanço transversal, apresentando de seguida alguns exemplos:

- Robaletes;
- Estabilizador giroscópico;
- Movimentação de cargas;
- Acção do leme;
- Asas hidrodinâmicas;

- Sistema de tanques passivo e activo;
- Aletas de estabilização.



Fig. 16.2 - Robaletes fixos ao casco.

Devido a considerações económicas, alguns destes dispositivos não são utilizados, contudo, outros embora não sendo dos mais eficientes continuam a ser utilizados devido à sua rentabilidade económica (caso dos robaletes fixos ao casco).

Os robaletes provocam o aumento do amortecimento viscoso, e assim, o aumento do coeficiente de amortecimento. Os robaletes são aletas em aço, fixas quase perpendicularmente ao casco do navio. O comprimento dos robaletes é cerca de 25 a 50% do comprimento do navio, e a largura varia entre 1 a 3 pés, ou seja, entre 30,5 a 91,5 cm.

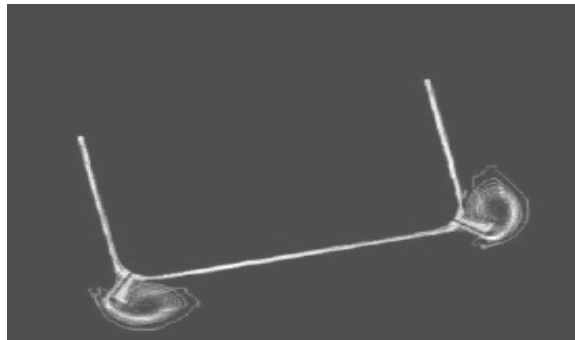


Fig. 16.3 – Ação dos robaletes fixos ao casco.

No caso dos navios que não possuem robaletes, o amortecimento do balanço transversal é feito através da dissipação de energia na superfície das ondas e nos escoamentos viscosos ao longo do casco, bem como às tensões superficiais.

Na figura seguinte é comparado o amortecimento produzido pelas protuberâncias existentes no casco de um navio com os robaletes. Na figura seguinte é visível que as protuberâncias no casco reduzem ligeiramente o balanço, ao passo que os robaletes reduzem muito mais o balanço, devido ao momento de amortecimento ser maior.

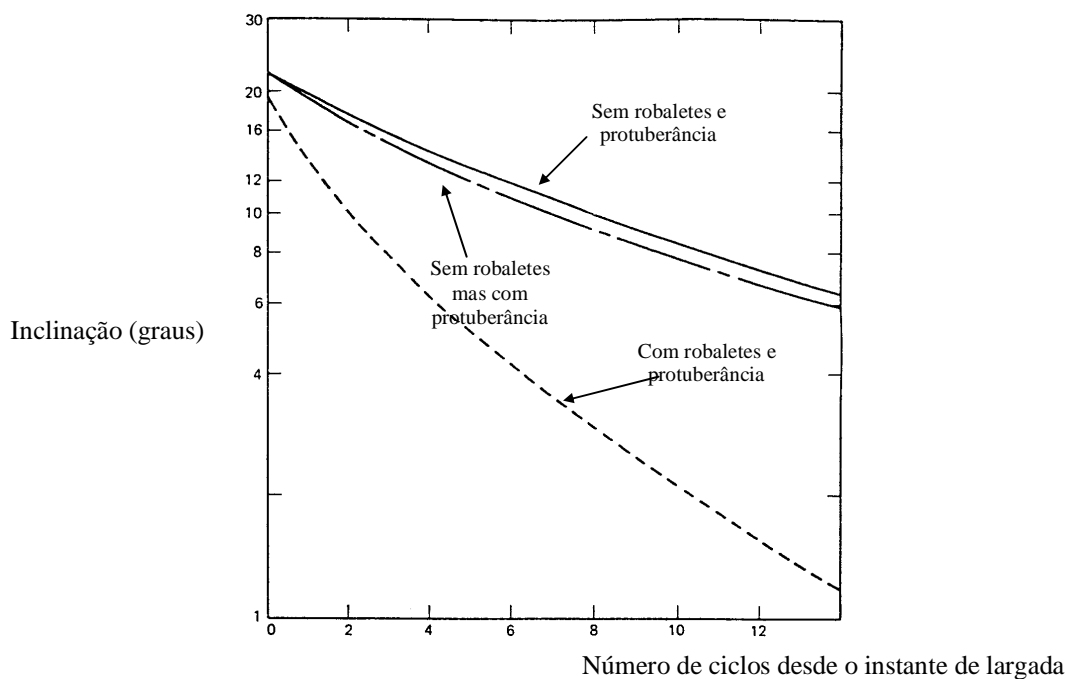


Fig. 16.4 - Influência dos robaletes na redução do balanço.

A velocidade do navio influencia o efeito de amortecimento dos robaletes. Ao aumentar a velocidade do navio, a força de sustentação gerada pelos robaletes também aumenta, e consequentemente aumenta a resistência ao balanço, proporcionando um maior efeito de amortecimento, tal pode ser verificado seguidamente:

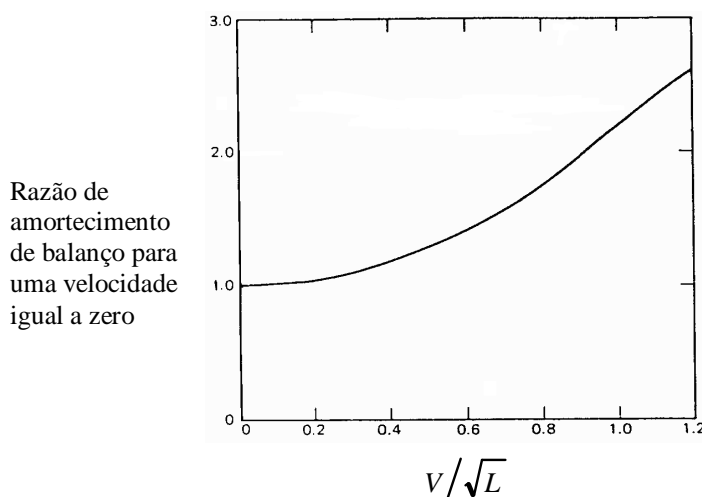


Fig. 16.5 - Variação da razão de amortecimento do balanço com o quociente entre a velocidade e o comprimento do navio.
[Battacharyya, Rameswar (1978)]

A força total exercida pelo robalete é dada pela seguinte expressão:

$$CA(r\omega_n)^2$$

Sendo igual à força exercida na direcção perpendicular ao robalete, onde:

A = área do robalete;

r = distância média entre a área do robalete e o centro de gravidade;

C = coeficiente de pressão normal que actua no robalete, $\approx 1,1$ a $1,7$ ft.lb.sec, dependendo da razão entre o comprimento e a largura do robalete;

ω_n = Velocidade angular natural.

O momento da força de amortecimento produzida pelo robalete em relação ao centro de gravidade do navio é dada por:

$$CAr^2 \cdot \omega_n^2 \cdot r = CAr^3 \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = \frac{CAr^3}{2240} \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \quad [\text{ft.t.sec}]$$

Como o coeficiente de amortecimento, y , é expresso como:

$$y = \frac{16\pi^2 M}{3W \cdot g \cdot \overline{GM} T_a^2}$$

onde M é o Momento de Amortecimento. O aumento de y devido aos robaletes, passa a ser:

$$\frac{16\pi^2}{3W \cdot g \cdot \overline{GM} T_a^2} \left(\frac{CAr^3}{2240} \right) = \frac{CAr^3}{1680I'_{xx}}$$

visto que

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{I'_{xx}}{W \cdot g \cdot \overline{GM}}}$$

Verifica-se que:

- ♦ O efeito de amortecimento aumenta com a área do robaleta, bem como, com a distância entre o robaleta e o eixo do movimento de balanço (é neste eixo que se situa o centro de gravidade do navio);
- ♦ Os robaletes são mais eficazes para grandes ângulos de balanço, uma vez que o decremento do balanço na presença de robaletes é dado por: $y\phi_a^2$;
- ♦ O efeito do robaleta é inversamente proporcional ao momento de inércia do navio segundo o eixo do movimento do balanço (eixo dos xx).

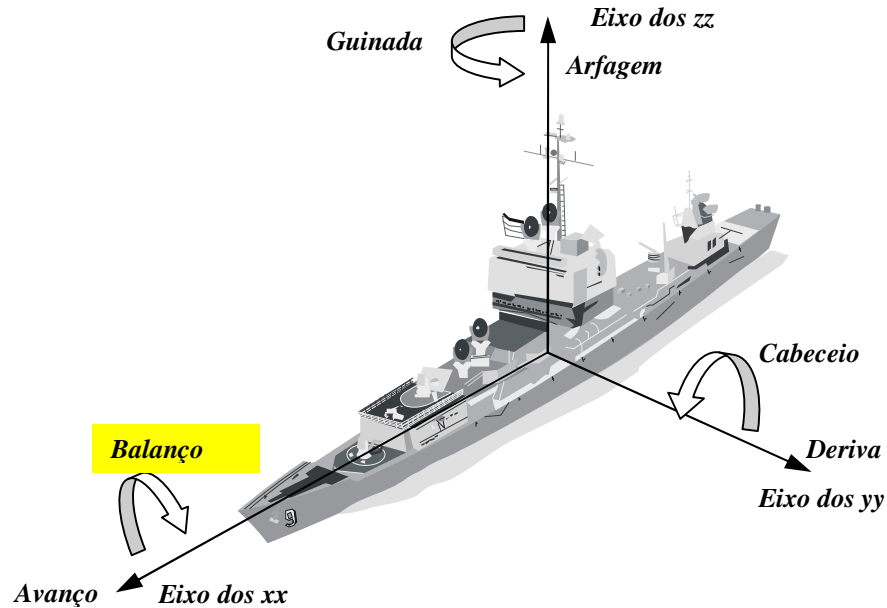


Fig. 16.6 - Representação dos seis graus de liberdade do navio.

Os robaletes são mais eficientes em navios com pequenos momentos de inércia, ou seja, quando o peso está todo concentrado junto da linha de mediania do navio.

A seguinte expressão empírica pode ser usada para determinar a relação entre a dimensão dos robaletes e o amortecimento do balanço do navio para uma velocidade igual a zero:

$$\left(\frac{y}{y_c} \right)_0 = \frac{0.55 \left(A_{BK} w^{1/2} + 0.0024 L B d^{1/2} \right) d^{5/2} \phi^{1/2}}{W B^2}$$

onde:

$(y/y_c)_0$ = razão entre o amortecimento actual e o amortecimento crítico para um sistema linear;

y_c = amortecimento crítico do balanço = $2\sqrt{zI'_{xx}}$ do sistema linear (navio);

A_{BK} = área total do robalete [ft²];

L = comprimento na linha de água [ft];

B = boca na linha de água [ft];

w = largura do robaleta [ft];

W = deslocamento [t];

ϕ = ângulo de adornamento [radianos];

d = distância entre o robaleta e a mediatriz da figura de flutuação [ft].

A alteração do amortecimento em função da velocidade pode ser dada por:

$$W\left(\frac{y}{y_c}\right) = \left(\frac{y}{y_c}\right)_v - \left(\frac{y}{y_c}\right)_0 = 0.00085 \left(\frac{L}{B}\right) \left(\frac{L}{GM}\right)^{1/2} \times \left(\frac{F_n}{C_B}\right) \left[1 + \frac{F_n}{C_B} + 2\left(\frac{F_n}{C_B}\right)^2\right]$$

onde:

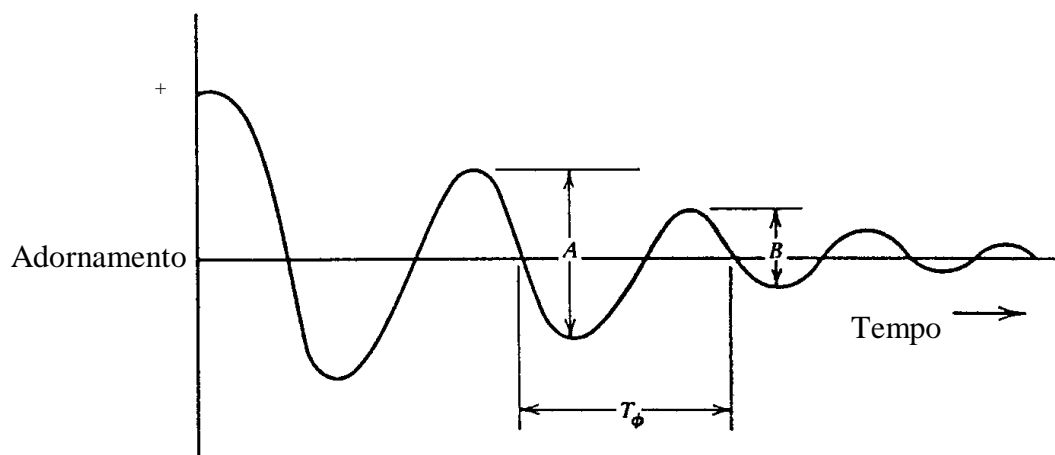
(y/y_c) = alteração do coeficiente de amortecimento transversal devido à velocidade V ;

$(y/y_c)_v$ = razão entre o amortecimento actual e o amortecimento crítico para uma velocidade V ;

F_n = número de Froude = V/\sqrt{gL} ;

C_B = coeficiente de obstrução.

O coeficiente de amortecimento transversal, tal como já foi referido, pode ser determinado através de ensaios de extinção de balanço, em águas tranquilas, como mostra a figura seguinte.



$$\ln \frac{A}{B} = 2 \pi \left(\frac{y}{y_c} \right) = 2 \pi \xi$$

(ξ : *coeficiente.de.amortecimento*)

Fig. 16.7 – Curva de extinção de balanço transversal para a determinação do coeficiente de amortecimento.

[Bhattacharyya, Rameswar (1978)]

17- O PROJECTO DO MODELO

A fim de realizar o estudo do amortecimento do balanço transversal com e sem robaletes, foi necessário conceber um modelo de casco convencional.

O casco do modelo não poderia ter uma forma qualquer, teria que existir um compromisso entre a forma do casco e os robaletes, de modo a, também, ser perceptível a influência destes no modelo. Para simplificar o projecto do modelo quanto à forma do casco e verificar com alguma certeza a influência dos robaletes no amortecimento do balanço, foi usado como referência, um navio verdadeiro com robaletes.

Sendo assim, foi usado como referência o casco das corvetas. Foram analisados diversos desenhos do casco das corvetas, bem como dos seus robaletes. Foi inclusivamente verificado *in loco*, a forma do casco, as dimensões e a localização dos robaletes.

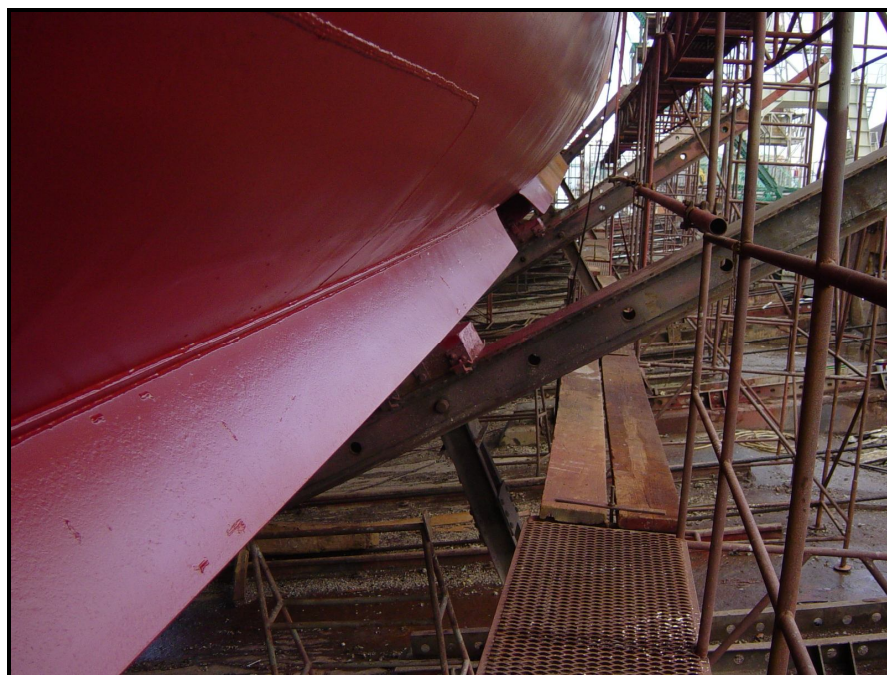


Fig. 17.1 - Robaletes de corveta da classe “Batista de Andrade”.

Como forma de simplificar o modelo, foi aplicada a Teoria das Faixas, conhecida como *Strip Theory*, que considera que o navio pode ser representado por um conjunto de secções transversais ao longo das quais o escoamento do fluido é essencialmente bidimensional. Em tudo semelhante a um processo de integração, a Teoria das Faixas, permite que o modelo considerado para a demonstração dos fenómenos de Dinâmica do Navio seja não um casco de um navio, mas sim uma ‘fatia’ deste.

Para aplicação desta teoria são assumidos os seguintes pressupostos:

- As respostas do navio variam linearmente com a altura das ondas;
- O comprimento entre perpendiculares do navio é muito maior que a sua boca e calado;
- Efeitos viscosos, que não os traduzidos pelo amortecimento do navio, são ilegíveis;
- O casco não possui nenhum efeito de sustentação dinâmica ou efeito planante e, assim sendo, a velocidade considerada para análise poderá ser igual a zero.

Foi escolhida a secção de maior boca da corveta, ou seja, a subestação nº11, como referência para a construção do casco do modelo:

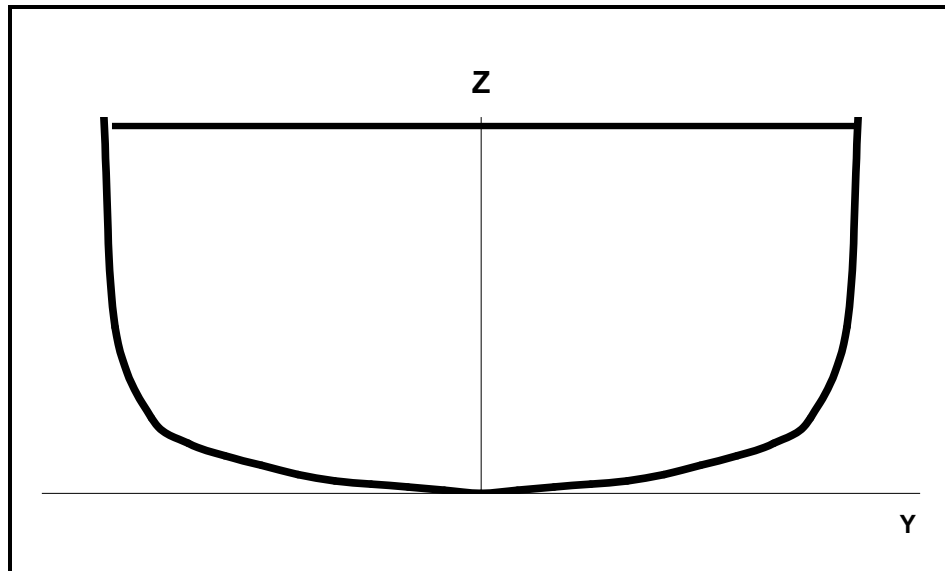


Fig. 17.2 - Representação gráfica da secção de maior boca das corvetas.

Já com a curvatura do casco do modelo definida, procedeu-se ao dimensionamento do mesmo. A seguir são apresentados os requisitos que contribuíram para o dimensionamento do modelo:

- Sendo a influência dos robaletes na estabilidade transversal um dos objectos de estudo, estes teriam de ter as dimensões adequadas de forma a permitir a verificação experimental do amortecimento produzido;
- Os robaletes teriam de ter um tamanho suficiente de forma a serem amovíveis;
- Tanto o modelo como os seus robaletes teriam que ser construídos à escala do navio de referência;
- O comprimento do modelo teria de ser determinado em função do comprimento dos robaletes: os robaletes têm cerca de 25 a 50% do comprimento do navio. No caso das corvetas, esta relação entre comprimentos é de 29%;

- O modelo não poderia ser muito grande, pois era pretendido um deslocamento inferior a 30 kg, de modo a não o tornar muito pesado;
- O modelo teria de ter o tamanho suficiente para possibilitar melhor clareza ao nível das leituras de balanço.

Observando com atenção os requisitos anteriormente apresentados, é claro que todo o processo de dimensionamento e posteriormente de escolha da escala, foi sempre em função dos robaletes, tendo-se chegado a um compromisso entre o tamanho destes e as dimensões do modelo. A escala que melhor traduziu esse compromisso foi a de 1:30.

Na seguinte tabela são apresentadas as dimensões de projecto do modelo calculadas, tendo em consideração a escala de 1:30 bem como a relação de 29% entre os comprimentos do modelo e dos robaletes.

DIMENSÕES DE PROJECTO DO MODELO		
Boca Máxima (cm)		34,3
Boca na Linha de Água (cm)		33,7
Pontal (cm)		20
Imersão (cm)		11
Comprimento (cm)		93
Robaletes (cm)	Comprimento	27
	Largura	1

Quadro nº 17.1 - Dimensões de Projecto do Modelo.

Após o dimensionamento e já com a curvatura do casco definida, o modelo foi materializado em ambiente *Solid Works*. Este seria construído em aço, aumentando a sua resistência estrutural e durabilidade.

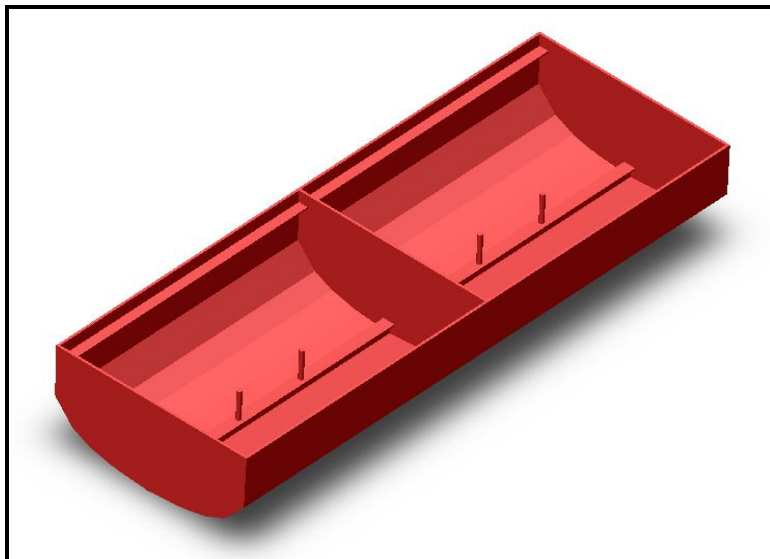


Fig. 17.3 - Representação do Modelo em ambiente *Solid Works*.

Na tabela seguinte são apresentadas as características calculadas e de projecto do modelo.

CARACTERÍSTICAS DE PROJECTO DO MODELO	
Volume Imerso, $V(\text{cm}^3)$	28800
Peso do Modelo (pesagem) (kgf)	11
Lastro (kgf)	18
Deslocamento, W (kgf)	29
Centro de Carena, \overline{KB} (cm)	6,22
Raio Metacêntrico, \overline{BM} (cm)	10,30
Altura do Metacentro, \overline{KM} (cm)	16,52

Centro de Gravidade (sem lastro), \overline{KG} (cm)	10,86
Centro de Gravidade (com lastro), \overline{KG} (cm)	11,15

Quadro nº 17.2 - Características de Projecto do Modelo.

Grande parte destas características foi calculada com recurso à *Regra de Simpson*, visto que a curva que representava a secção do casco do modelo era definida por coordenadas de pontos.

Como era pretendido um deslocamento de 29 kg, foi necessário lastrar o modelo com 18 kg, tendo sido usado para esse efeito oito chapas de aço. Sem lastro, o modelo tem o seu Centro de Gravidade localizado a 10,86 cm acima da quilha.

A distribuição do lastro no modelo é fundamental para posicionar o Centro de Gravidade na posição pretendida, de forma a obter uma Altura Metacêntrica, \overline{GM} , aceitável para um período natural de balanço adequado aos Ensaios de Extinção de Balanço.

Para tal, os 18 kg de lastro foram distribuídos pelo modelo de acordo com a seguinte figura. Quatro chapas foram colocadas a 8 cm da quilha e as restantes quatro a 19 cm, ficando o modelo com o Centro de Gravidade localizado a 11,15 cm acima da quilha, uma Altura Metacêntrica igual a 5,37 cm e um período de balanço de cerca de 1 s.



Fig. 17.4 - Distribuição do lastro pelo modelo.

17.1- Construção do Modelo

O modelo foi construído em aço e soldado manualmente com eléctrodos revestidos. Sendo constituído pelas seguintes partes: três balizas em aço com 4 mm de espessura, 200 mm de altura e 343 mm de largura, uma quilha de aço em ‘T’ com 4 mm de espessura, 30 mm de altura e 20 mm de largura, duas longarinas em aço com 930 mm de comprimento, 20 mm de largura e 4 mm de espessura e uma chapa de costado galvanizada com 1 mm de espessura, 930 mm de comprimento e 660 mm de largura:



Fig. 17.5 - Partes constituintes do modelo.

O modelo foi pintado com tinta de cor vermelha, garantido a sua protecção contra a corrosão. Na quilha foram soldados simetricamente quatro parafusos para permitir a fixação do lastro ao modelo. As longarinas foram utilizadas como apoios de fixação de quatro ripas para o convés, ripas essas que serviram para colocar quatro chapas de lastro.

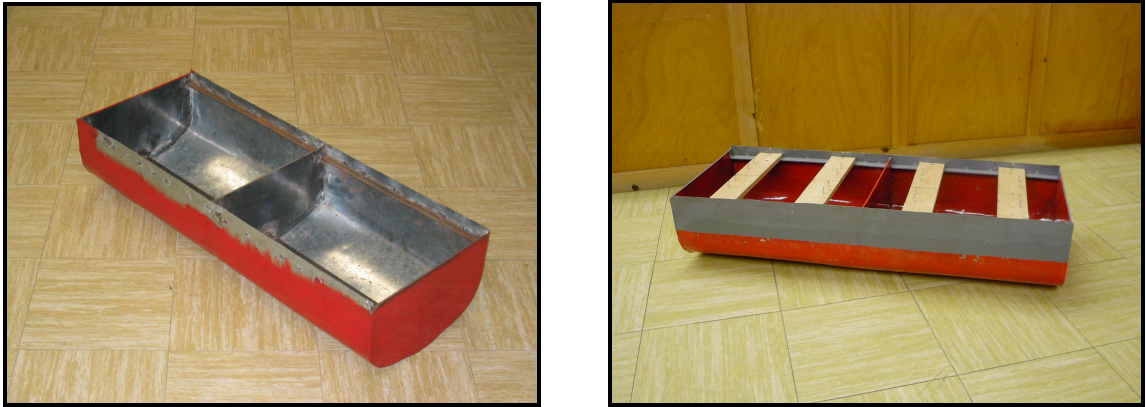


Fig. 17.6 - Evolução da construção do Modelo.

Na figura seguinte é visível que não existe qualquer adorno resultante da construção, estando o modelo em equilíbrio e simetricamente construído.

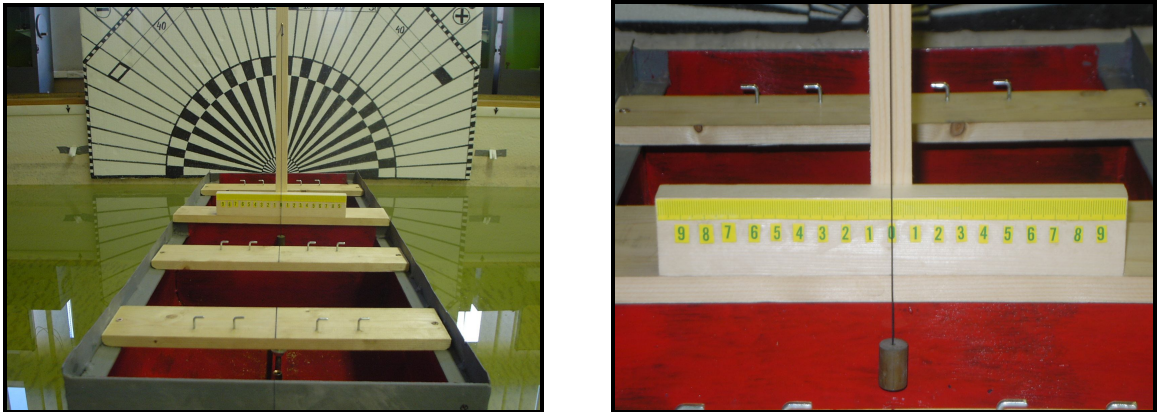


Fig. 17.7 - Modelo equilibrado.

17.2- Construção e Colocação dos robaletes

Foram construídos dois robaletes em aço, com 270 mm de comprimento, 10 mm de largura e 1 mm de espessura. Estes teriam de ser amovíveis, afim de se poder realizar experiências com e sem robaletes, tendo sido soldados aos mesmos dois parafusos, que iriam permitir a fixação dos robaletes ao casco, como mostra a seguinte figura:

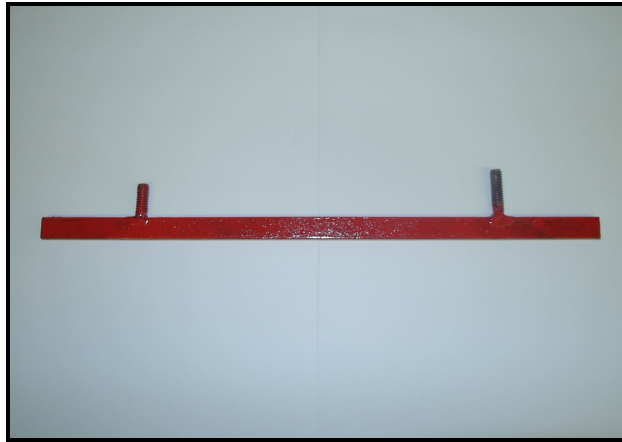


Fig. 17.8 - Robaleta do Modelo.

Para que os robaletes pudessem ser colocados no casco do modelo, este teve que ser furado, mas, só depois de determinada e marcada a sua localização no casco. Como é evidente, a localização dos robaletes no casco é a mesma que a do casco de referência.



Fig. 17.9 - Furações no casco para fixação dos robaletes.

Depois de colocados, os robaletes foram fixos ao casco com as porcas dos parafusos, tendo sido utilizada borracha como vedante.



Fig. 17.10 - Parafusos de fixação dos robaletes.

Na seguinte figura é visível a localização do robalete no casco, bem como a proporção de comprimentos entre o robalete e o modelo.



Fig. 17.11 - Proporção dos robaletes com o modelo.

17.3- O Lastro

O deslocamento do casco do modelo obtido através de pesagem foi 11 kg,. Uma vez que o deslocamento pretendido era de 29 kg, teve que se lastrar o modelo com 18 kg. Como 18 kg de lastro é um peso considerável, foi escolhido o aço como material para lastrar o modelo.

Foram calculadas as dimensões e a quantidade de chapas de aço necessárias para lastrar o modelo, tendo em atenção o sistema de fixação de lastro, o espaço e as dimensões no interior do modelo. Foram cortadas, no Arsenal do Alfeite, oito chapas de aço com 10 mm de espessura, 240 mm de comprimento, 120 mm de largura e com dois furos de 12 mm de diâmetro, para permitir a sua fixação ao modelo, perfazendo um peso de 2,25 kg por cada chapa.



Fig. 17.12 - Lastro do Modelo.

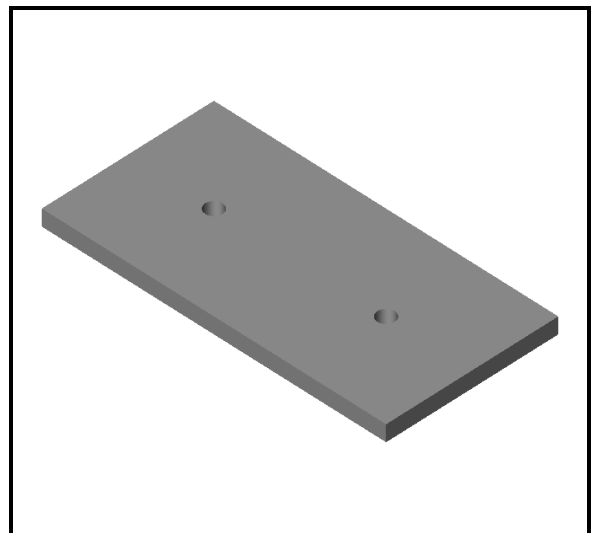


Fig. 17.13 - Representação em *Solid Works* do Lastro do Modelo.

17.4- Sistema de amarração do Modelo

A amarração do modelo foi efectuada de modo a que o modelo ficasse apenas com um grau de liberdade (ou seja o balanço), ficando os outros cinco graus de liberdade imobilizados. Efectivamente este objectivo foi impossível de atingir, uma vez que um certo abatimento, e alguma arfagem, estiveram sempre associados ao

movimento de balanço do modelo. Contudo o presente sistema de amarração conseguiu minimizar estes dois graus de liberdade.

O sistema de amarração do modelo é constituído por seis ventosas e quatro fios de *nylon*. As ventosas estão assinaladas por circunferências a vermelho, e os fios de *nylon* por linhas a vermelho.

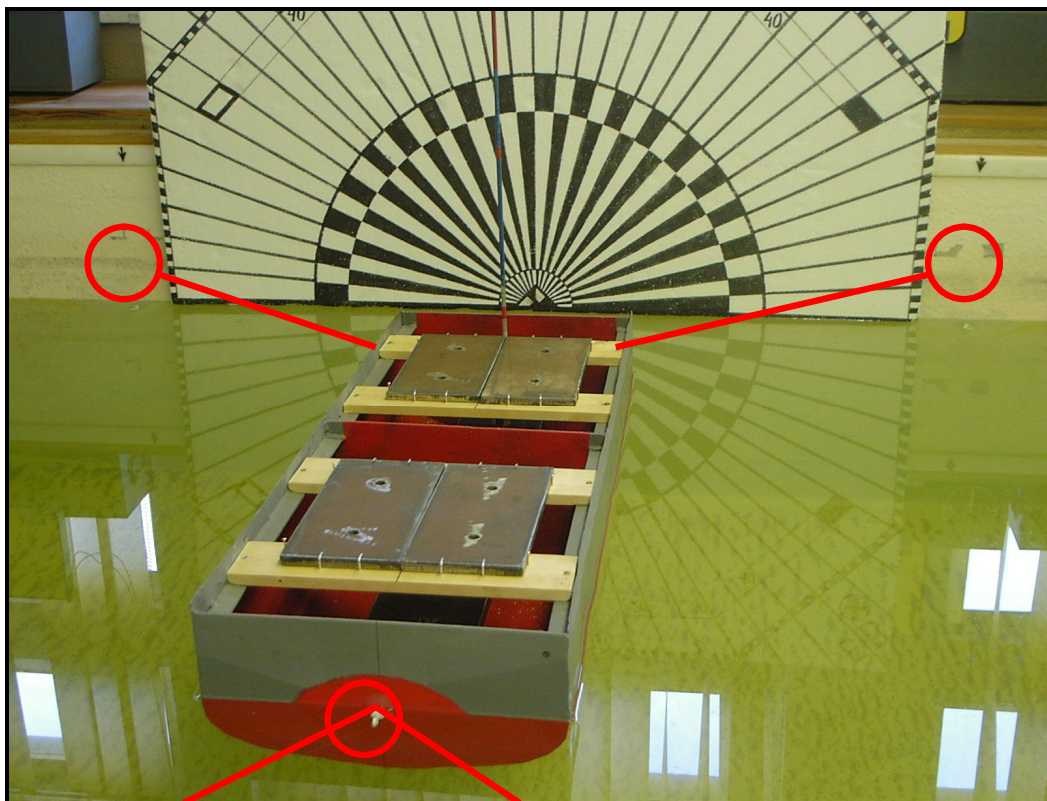


Fig. 17.14 - Vista frontal do Sistema de Amarração.

Um navio não possui um eixo de rotação fixo para o movimento de balanço, como consequência de se encontrar num meio dual, isto é, em dois meios: água e ar. Estando sujeito a efeitos dinâmicos diferentes, uns devido à água, outros ao ar, o navio terá o seu movimento de balanço transversal em torno de um eixo não fixo, mas próximo do eixo que contém o Centro de Gravidade.

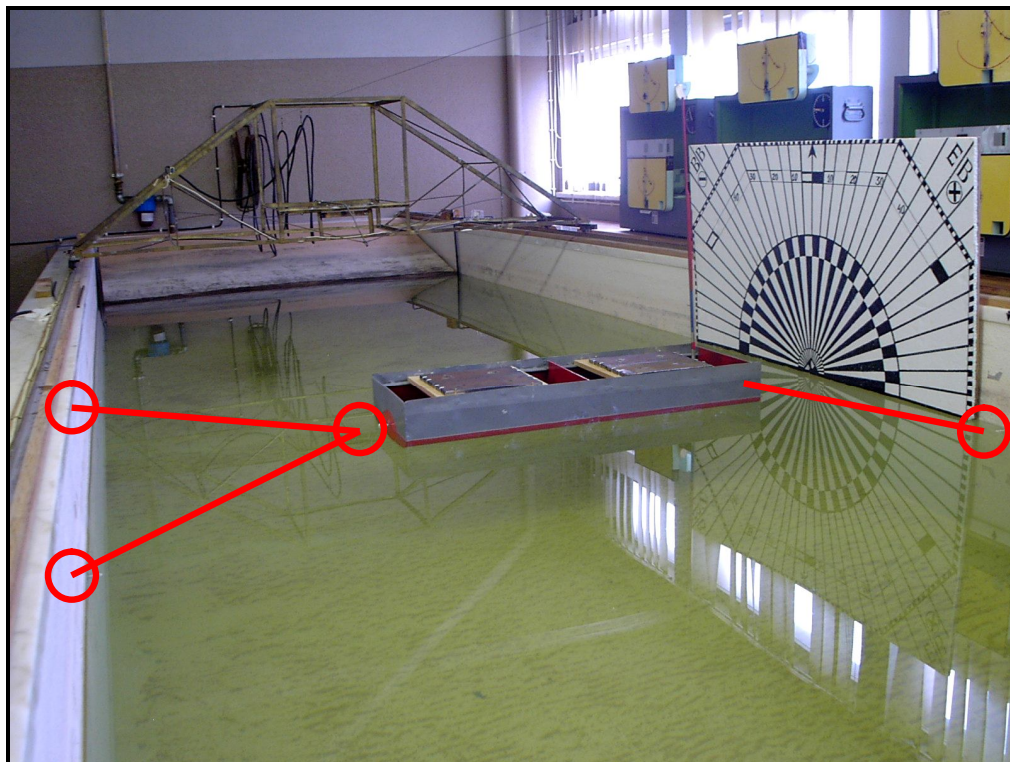


Fig. 17.15 - Vista lateral do Sistema de Amarração.

Como simplificação ao Sistema de Amarração, assume-se para o modelo que o eixo de rotação para o movimento de balanço transversal é fixo e contém o Centro de Gravidade.

No modelo pretendia-se que a amarração não influenciasse as características de balanço do mesmo. Sendo assim, e assumindo o eixo para o movimento de balanço transversal como sendo o eixo longitudinal contendo o Centro de Gravidade, o modelo foi fixo em um só ponto da secção de vante e da secção de ré. Como tal, as duas ventosas do modelo, foram fixas com a mesma posição vertical do Centro de Gravidade, e os fios de *nylon* a elas atados permaneceram paralelos à superfície da água.

O modelo foi fixo no tanque, numa posição, de modo a que a origem da haste de alumínio fixa perpendicularmente ao convés do modelo, coincidi-se com o centro do alvo.

As ventosas garantiram uma excelente fixação do fio de *nylon* às paredes do tanque, bem como ao modelo.

17.5- Procedimento Experimental e apresentação de resultados

17.5.1 - Objectivos

O objectivo das experiências prende-se com a necessidade de verificar e confirmar algumas características de projecto do modelo, de verificar as teorias abordadas, bem como comparar os resultados obtidos com os resultados esperados.

Para a execução das experiências, foram utilizadas as instalações do Departamento de Engenheiros Navais – Ramo de Mecânica da Escola Naval, mais concretamente o tanque do Laboratório de Arquitectura Naval. O tanque do laboratório está apetrechado com um gerador de ondas e uma praia que permite dissipar as ondas geradas, tal como mostra a figura seguinte.



Fig. 17.16 - Tanque de Experiências do Laboratório de Arquitectura Naval.

A fase experimental do presente trabalho, com o modelo, dividiu-se nas seguintes partes:

- Prova de Estabilidade;
- Prova de Suspensão;

- Ensaios de Extinção de Balanço;
- Obtenção e interpretação de resultados (conclusões).

Além das provas de suspensão, provas de estabilidade e ensaios de extinção de balanço (com e sem robaletes) para diversas condições de deslocamento do modelo, foi experimentado o método para um caso real (navio a navegar) – ver anexo E.

Através da observação dos diversos valores obtidos e da observação dos gráficos de balanço transversal, foram tiradas diversas conclusões, adiante referidas.

17.5.2 - Prova de Estabilidade e prova de suspensão

O objectivo principal da Prova de Estabilidade é determinar a posição vertical verdadeira do Centro de Gravidade do modelo, confrontando a posição obtida com a calculada na fase de projecto do modelo.

Para a execução das provas foi utilizado um inclinómetro de precisão, cujas características constam no anexo A:

Duas chapas de aço, cada uma com 2,25 kg, localizadas no convés do modelo, correspondentes ao lastro do mesmo, foram deslocadas de diversas distâncias, d , desde o plano de mediania ao bordo do modelo.

Em cada prova efectuou-se pelo menos três leituras de adorno, primeiramente sem qualquer deslocação do lastro, e depois com o lastro para bombordo e por fim para estibordo. Nalgumas provas foram feitas comparações entre o adorno lido com o inclinómetro e o adorno lido com o pêndulo.

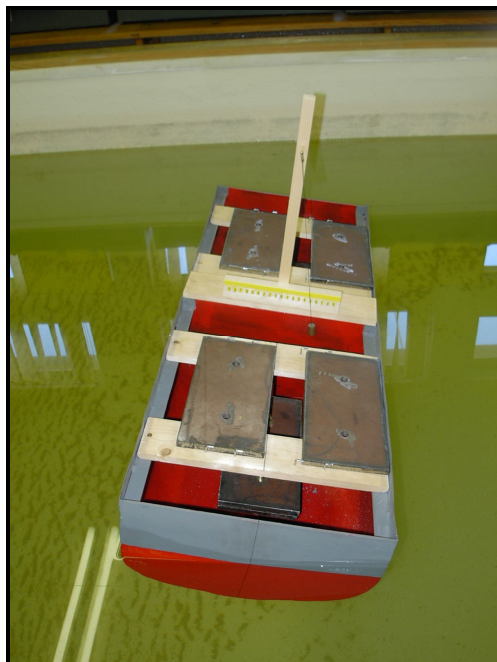


Fig. 17.17 - Deslocamento do lastro durante uma Prova de Estabilidade (com o pêndulo).

Foi construída uma tabela com as leituras das deflexões, pela utilização do pêndulo (e comparado com os valores do inclinómetro), de todas as provas.

PROVA Nº	LEITURAS DE DEFLEXÃO, a (cm)		
	BOMBORDO	MEDIANIA	ESTIBORDO
1	4,0	0,0	4,2
2	4,1	0,0	4,3
3	3,9	0,0	4,2
4	4,0	0,0	4,1
5	4,0	0,0	4,2
MÉDIA	4,0	0,0	4,2
TAN θ	0,1600	0,0000	0,1680

θ (RADIANOS)	0,1587	0,0000	0,1664
θ (°)	9,0903	0,0000	(deve ser menor ou igual a 4°)9,5366

Quadro nº 17.3- Leituras de Deflexão no modelo.

A deflexão média sentida pelo pêndulo foi, $a_m = 4,1$ cm

Sabendo que:

$$w = 2,25 \text{ kg}$$

$$d = 6 \text{ cm}$$

$$W = 29 \text{ kg}$$

$$l = 25 \text{ cm}$$

$$\overline{KM} = 16,52 \text{ cm}$$

Através da equação: $\overline{GM} = \frac{w \cdot d}{W \cdot \frac{a}{l}}$

É obtida a Altura Metacêntrica, $\overline{GM} = 5,68 \text{ cm}$

E através da equação: $\overline{KG} = \overline{KM} - \overline{GM}$

Temos que a altura do Centro de Gravidade é de: $\overline{KG} = 10,84 \text{ cm}$

A Prova de Suspensão foi efectuada com a finalidade de determinar a posição do Centro de Gravidade, sendo mais um método válido para aferir a posição vertical verdadeira do Centro de Gravidade.

Para poder efectuar a Prova de Suspensão, foi necessário suspender o modelo, de uma forma semelhante à representada na figura a seguir, tendo para o efeito sido construídos dois suportes em madeira.

Visto que o modelo (com lastro), tem um peso de 29 kg, os suportes que sustentariam o modelo teriam que ser robustos, resistentes e com uma área de contacto suficiente de forma a distribuir o peso do modelo pelos suportes.

Foram então construídos dois suportes em madeira, como mostrado a seguir:

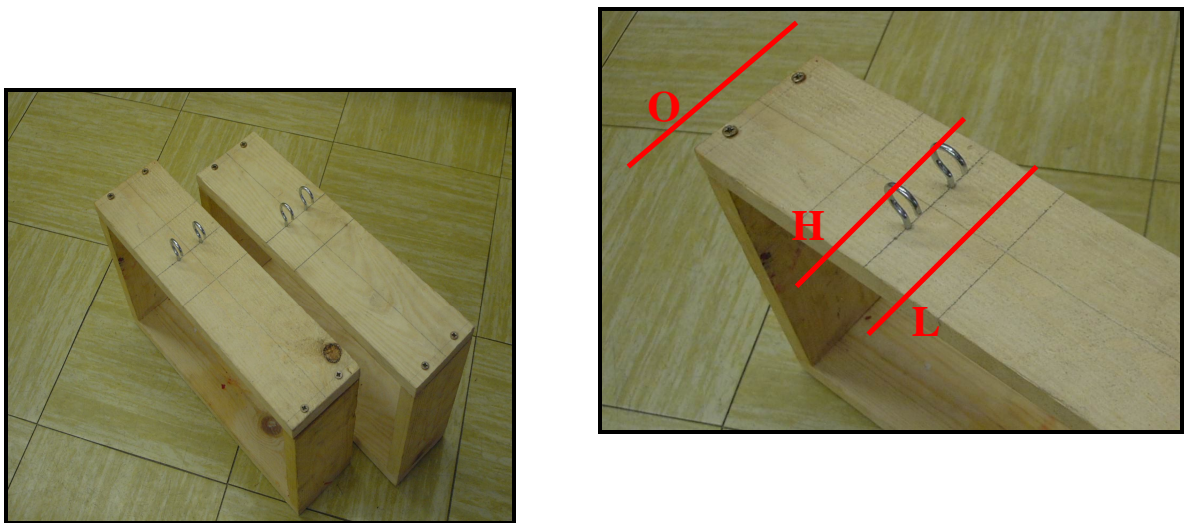


Fig. 17.18 - Suportes em madeira de sustentação do modelo.

Depois de construídos os suportes, o modelo foi colocado nos mesmos, ficando cada suporte localizado no meio de cada metade do modelo. Posteriormente o conjunto foi suspenso num varão de aço resistente, pelos camarões dos suportes, chamado o ponto *pivot*. Ficando naturalmente inclinado com um ângulo ϕ , como ilustrado seguidamente.

O ângulo correspondente à inclinação do modelo foi registado e por fim, calculada a posição vertical do Centro de Gravidade.



Fig. 17.19 - Suportes colocados no modelo.

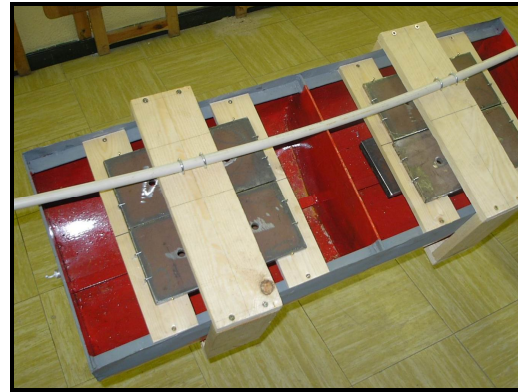


Fig. 17.20 - Modelo Suspenso.

O modelo ao ser suspenso, ficou inclinado com um determinado ângulo, ϕ .

Através das equações $\overline{GL} = \frac{\overline{HL}}{\tan\phi}$ e $\overline{KG} = \overline{KL} - \overline{GL}$

Não esquecendo de subtrair a \overline{GL} , a espessura da madeira correspondente ao suporte (cerca de 2 cm).

$$\text{Obtém-se } \overline{KG} = \overline{KL} - \frac{\overline{HL}}{\tan\phi} - 2$$

Sabendo que:

$$\overline{KL} = 20 \text{ cm}$$

$$\overline{HL} = 5 \text{ cm}$$

$$\phi = 24,5^\circ$$

Então $\overline{KG} = 11 \text{ cm}$ ($\sim 10,84 \text{ cm}$ da prova de estabilidade)

17.5.3 - Ensaio de Extinção de Balanço

O instrumento utilizado para a leitura e registo de tempos e de ângulos de adorno, foi um inclinómetro de precisão. A recolha e tratamento dos dados foram feitos por intermédio da ligação do sensor a um computador portátil, nomeadamente com recurso ao MATLAB e à folha de cálculo Microsoft Office Excel.

Por fim, com os registos obtidos pelas leituras do inclinómetro e depois devidamente tratadas e analisadas, foram desenhados os gráficos tempo-adorno correspondentes, calculadas as características necessárias para a caracterização dos movimentos oscilatórios amortecidos e tiradas as conclusões tidas por convenientes.

Alguns dos objectivos na execução dos Ensaio de Extinção de Balanço foi determinar o período de balanço, o coeficiente de amortecimento no modelo de casco convencional e o amortecimento produzido pelos robaletes no mesmo modelo, procurando quantificar a redução de balanço que estes robaletes proporcionam, bem como as alterações no período de balanço e no coeficiente de amortecimento com diferentes condições de carga (deslocamentos diferentes e diversas alturas do centro de gravidade).

O factor de amortecimento é determinado com recurso ao decremento logarítmico, através da equação:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{\phi_0}{\phi_n} = 2\pi\xi$$

Após a análise do gráfico do movimento livre linear amortecido (identificação do período do movimento, amplitude da 1ª e 2ª oscilação), e seguidamente com o cálculo do factor de amortecimento através da fórmula do decremento logarítmico, desenvolve-se todo o cálculo necessário para se obter as características do movimento e a respectiva equação do movimento, tanto do modelo como no navio real.

Seguidamente mostram-se alguns gráficos resultantes das experiências efectuadas no modelo com diferentes situações de carga, sem e com robaletes:

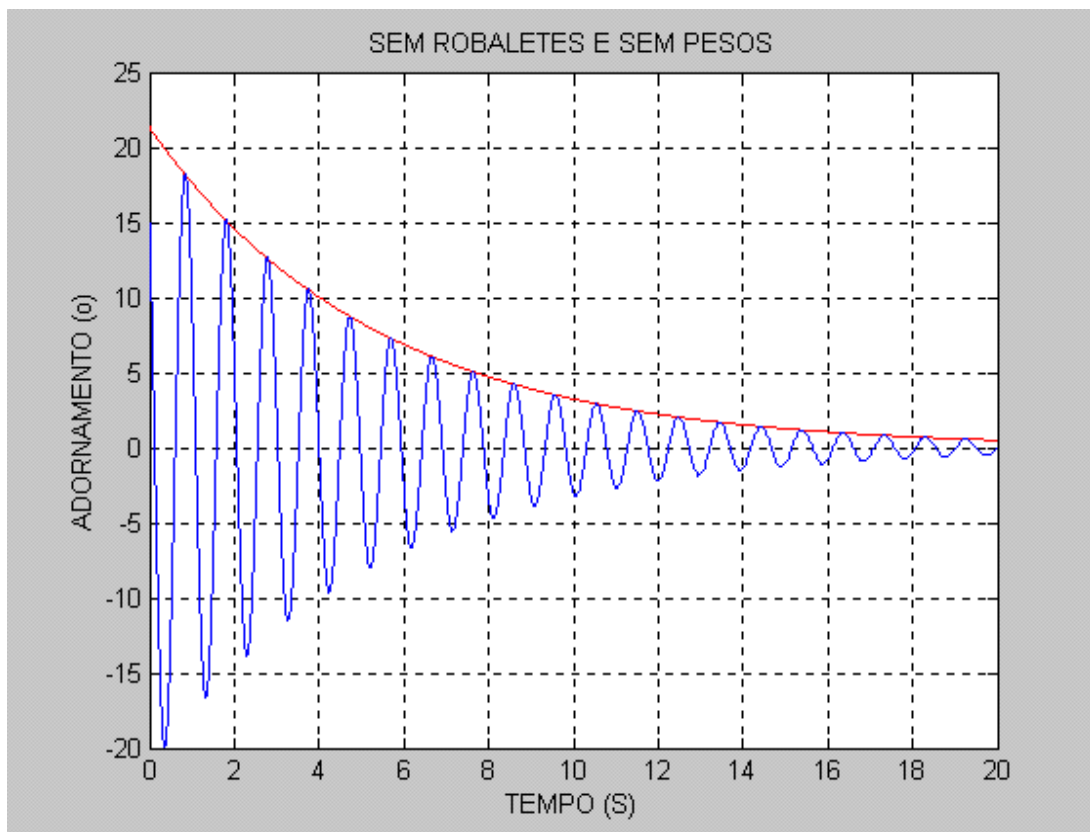


Fig. 17.21 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e sem pesos.

$T=0.97$ s
 $dl=0.1823$
 $ca=0.1880$
 $W=6.4775$ rad/s
 $Wo=6.4748$ rad/s
 $fa=0.0290$
 $\phi=-0.7910$ rad
 $Vo=-101.0830$ m/s

Legenda:

T = período do movimento amortecido (s);
 dl = decremento logarítmico;
 ca = coeficiente de amortecimento;
 $W = W_n$ = frequência angular natural (rad/s);
 $Wo = Wa$ = frequência angular amortecida (rad/s);
 fa = factor de amortecimento;
 ϕ = ângulo de fase (rad);
 Vo = velocidade inicial (m/s).

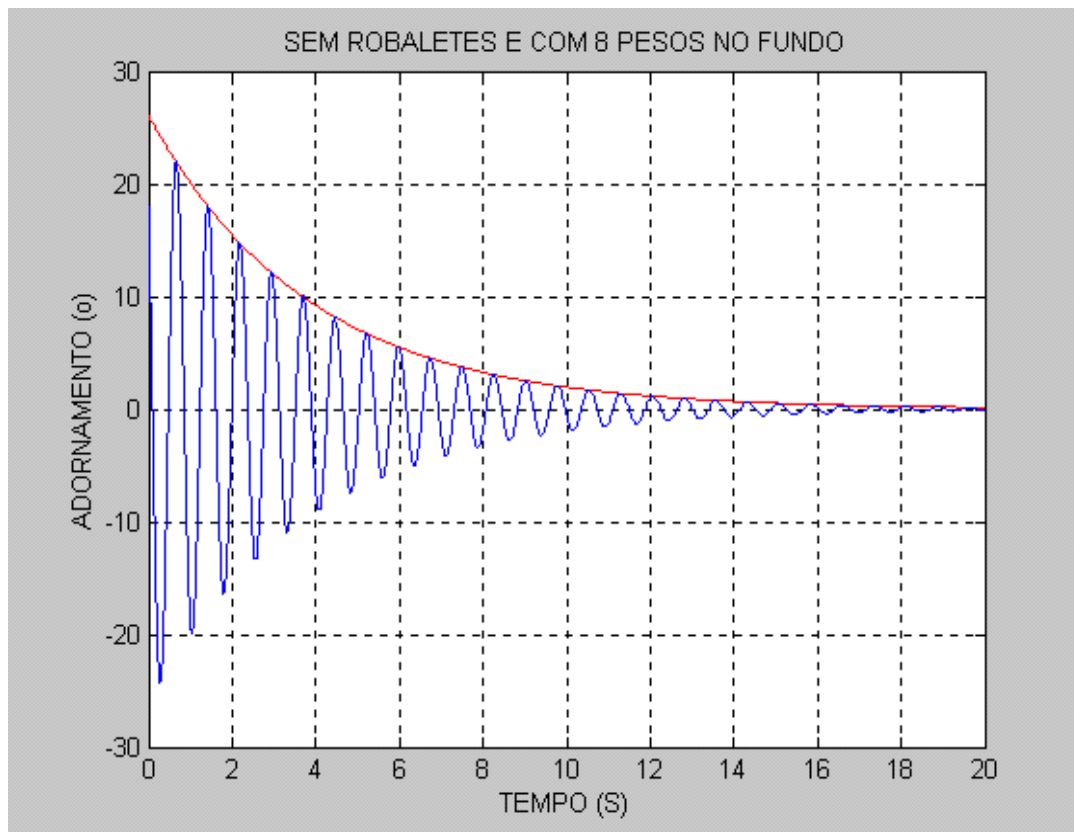


Fig. 17.22 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e com 8 pesos no fundo.

$T=0.76$ s
 $dl=0.1967$
 $ca=0.2588$
 $W=8.2673$ rad/s
 $W_o=8.2633$ rad/s
 $fa=0.0313$
 $\phi=-0.8084$ rad
 $V_o=-160.4651$ m/s

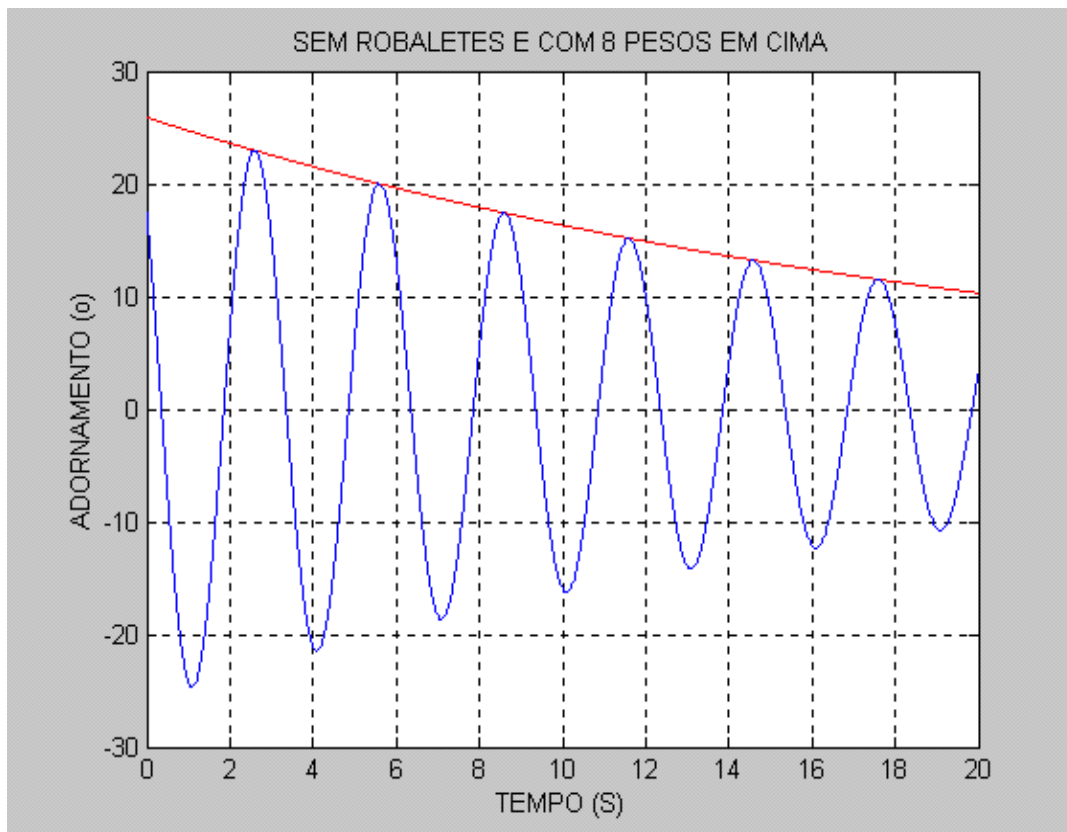


Fig. 17.23 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e com 8 peso sem cima.

$T=3$ s
 $dl=0.1382$
 $ca=0.0461$
 $W=2.0944$ rad/s
 $W_o=2.0939$ rad/s
 $fa=0.0220$
 $\phi=-0.8292$ rad
 $V_o=-40.8163$ m/s

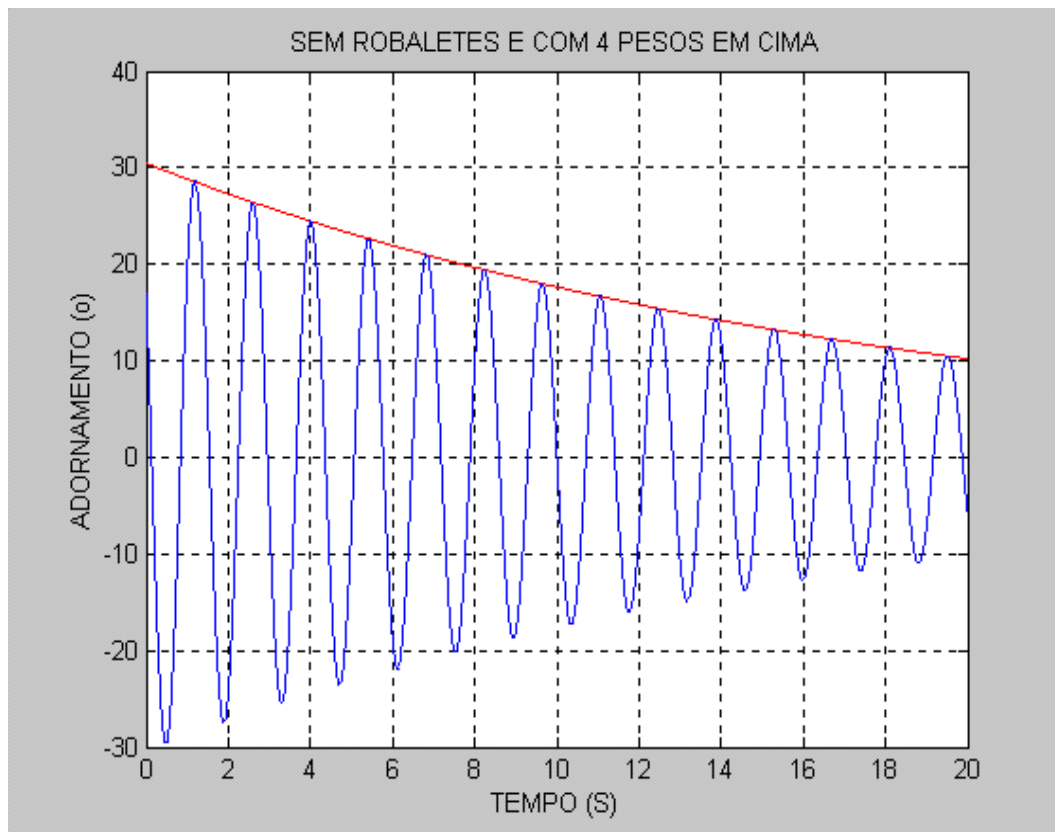


Fig. 17.24 – Movimento oscilatório do modelo sem robaletes e com 4 pesos em cima.

$T=1.41$ s
 $dl=0.1382$
 $ca=0.0461$
 $W=2.0944$ rad/s
 $W_o=2.0939$ rad/s
 $fa=0.0220$
 $\phi=-0.8292$ rad
 $V_o=-40.8163$ m/s

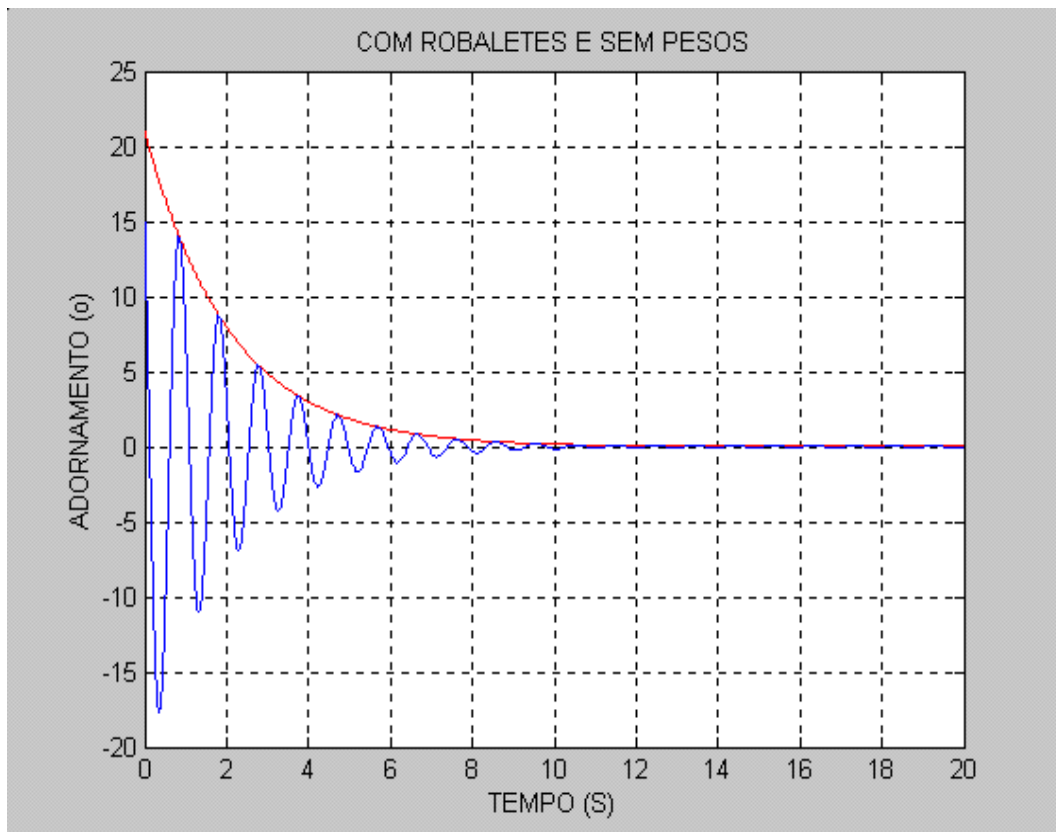


Fig. 17.25 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e sem pesos.

$T=0.97$ s
 $dl=0.4700$
 $ca=0.4845$
 $W=6.4775$ rad/s
 $Wo=6.4594$ rad/s
 $fa=0.0750$
 $\phi=-0.7774$ rad
 $Vo=-102.8881$ m/s

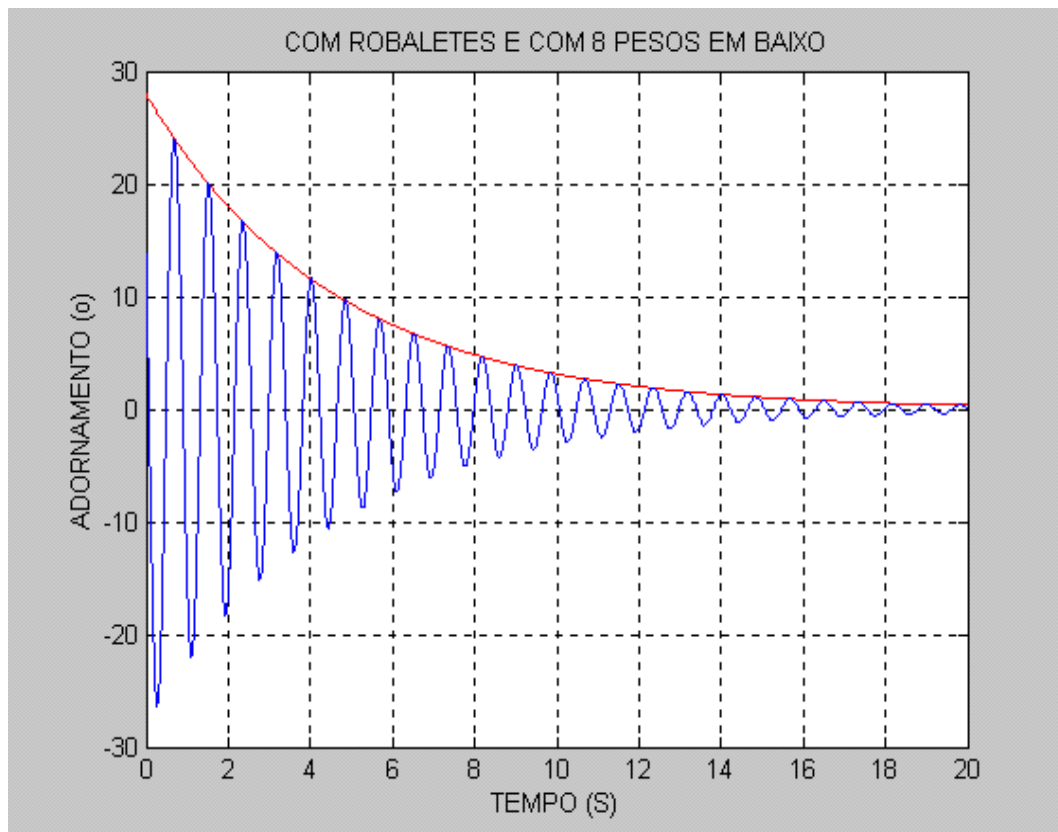


Fig. 17.26 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 8 pesos no fundo.

$T=0.833$ s
 $dl=0.1823$
 $ca=0.2189$
 $W=7.5428$ rad/s
 $W_o=7.5397$ rad/s
 $fa=0.0290$
 $\phi=-1.0566$ rad
 $V_o=-186.5942$ m/s

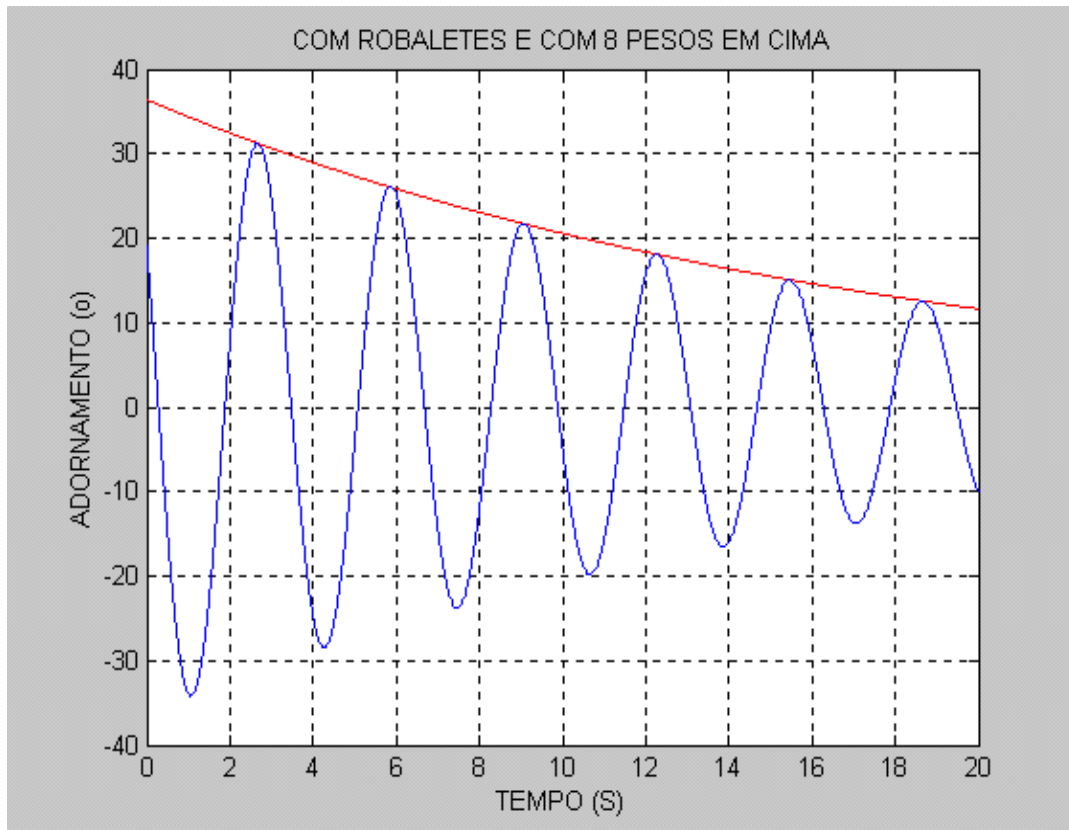


Fig. 17.27 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 8 pesos em cima.

$T=3.2$ s
 $dl=0.1823$
 $ca=0.0570$
 $W=1.9635$ rad/s
 $W_o=1.9627$ rad/s
 $fa=0.0290$
 $\phi=-1.0218$ rad
 $V_o=-62.0690$ m/s

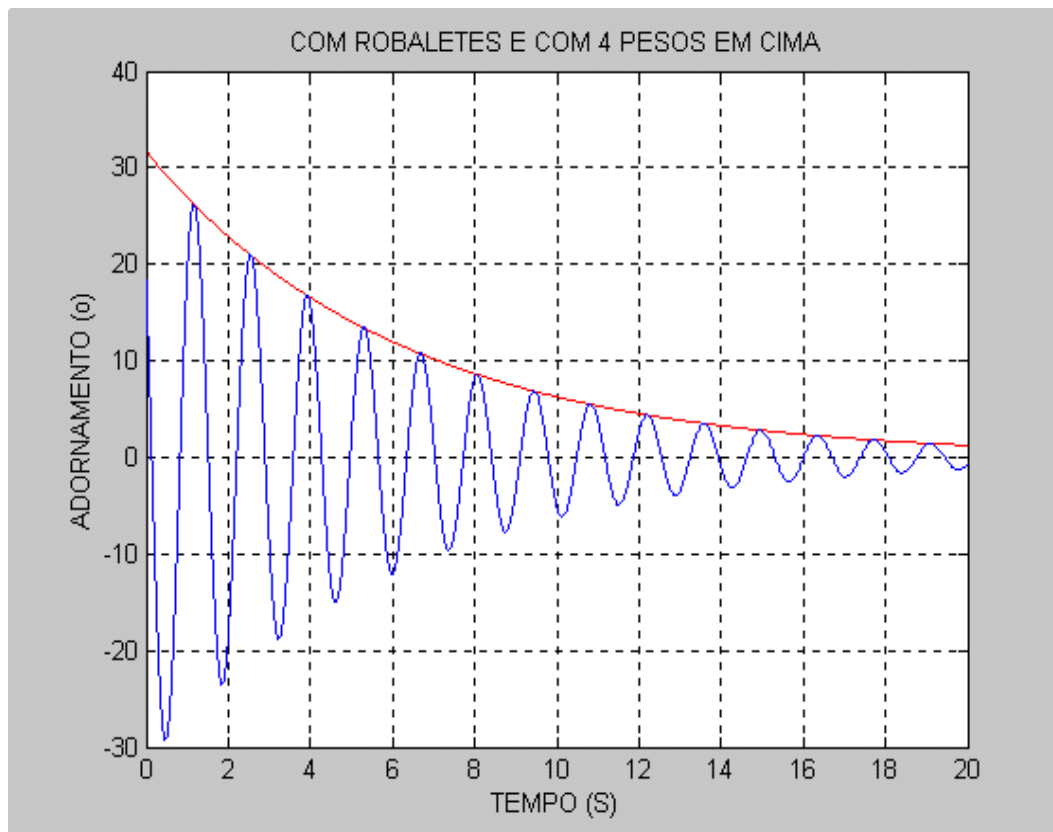


Fig. 17.28 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 4 pesos em cima.

$T=1.38$ s
 $dl=0.2231$
 $ca=0.1617$
 $W=4.5530$ rad/s
 $Wo=4.5502$ rad/s
 $fa=0.0355$
 $\phi=-0.9484$ rad
 $Vo=-120.3$ m/s

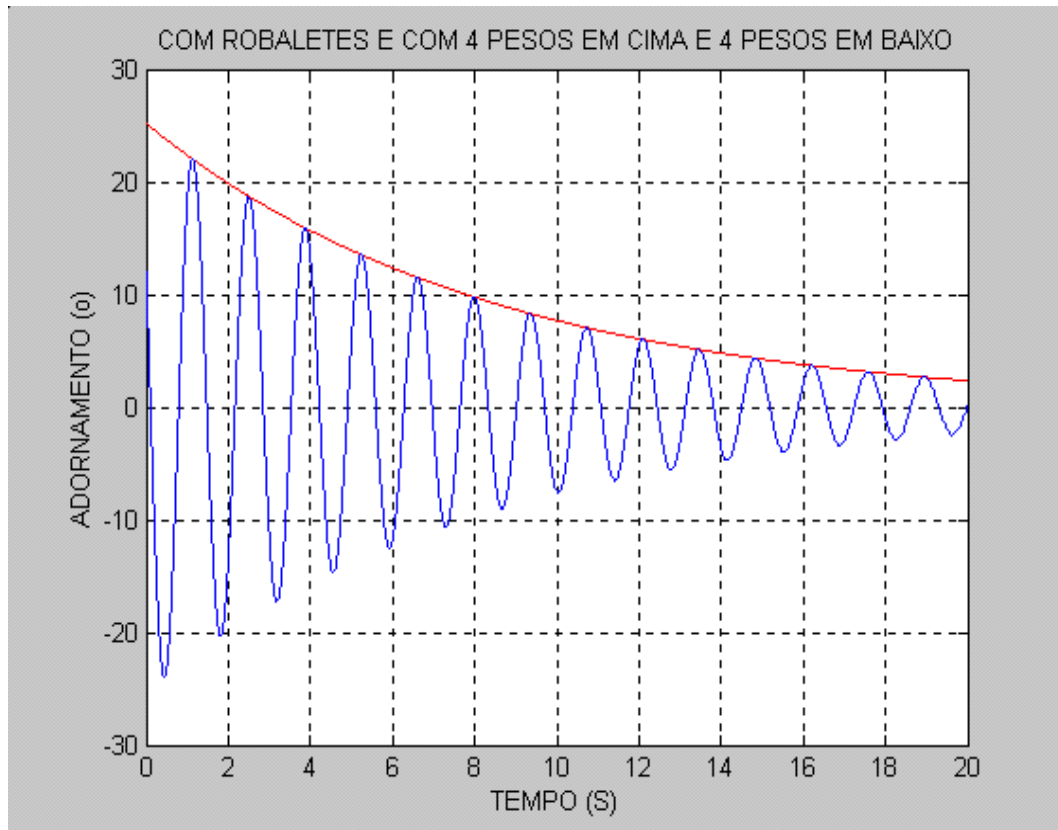


Fig. 17.29 – Movimento oscilatório do modelo com robaletes e com 4 pesos em cima e com 4 pesos no fundo.

$T=1.371$ s
 $dl=0.1625$
 $ca=0.1185$
 $W=4.5829$ rad/s
 $W_o=4.5814$ rad/s
 $fa=0.0259$
 $V_o=-103.2165$ m/s
 $\phi=-1.0755$ rad
 $m=32.2$ Kg

$K=676.3020$ N/m (constante de rigidez do sistema elástico livre e amortecido)
 $C=7.6340$ N.s/m (constante de amortecimento do sistema elástico livre e amortecido)

Como tínhamos analisado, para o movimento oscilatório livre e subamortecido, as fórmulas das características principais são:

- frequência própria angular (ou natural):

$$W_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

- coeficiente de amortecimento critico e - factor de amortecimento:

$$c_c = 2.m.W_n$$

- frequência circular do movimento amortecido:

$$W_a = W_n \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2}$$

- Equação geral do movimento livre amortecido:

$$x = X_0 e^{-(c/m)t} \text{sen}(W_a t + \theta)$$

- Equação da envolvente (exponencial negativa):

$$X_0 e^{-(c/m)t}$$

- decremento logarítmico:

$$\delta \cong 2\pi\xi$$

Ou seja, para o último exemplo temos que:

Eq. Envolvente: $Y = 25,24.e^{(-0,1185.t)}$

Eq. Movimento: $\theta = 25,24.e^{(-0,1185.t)}.sen(4,5814.t - 1,0755)$

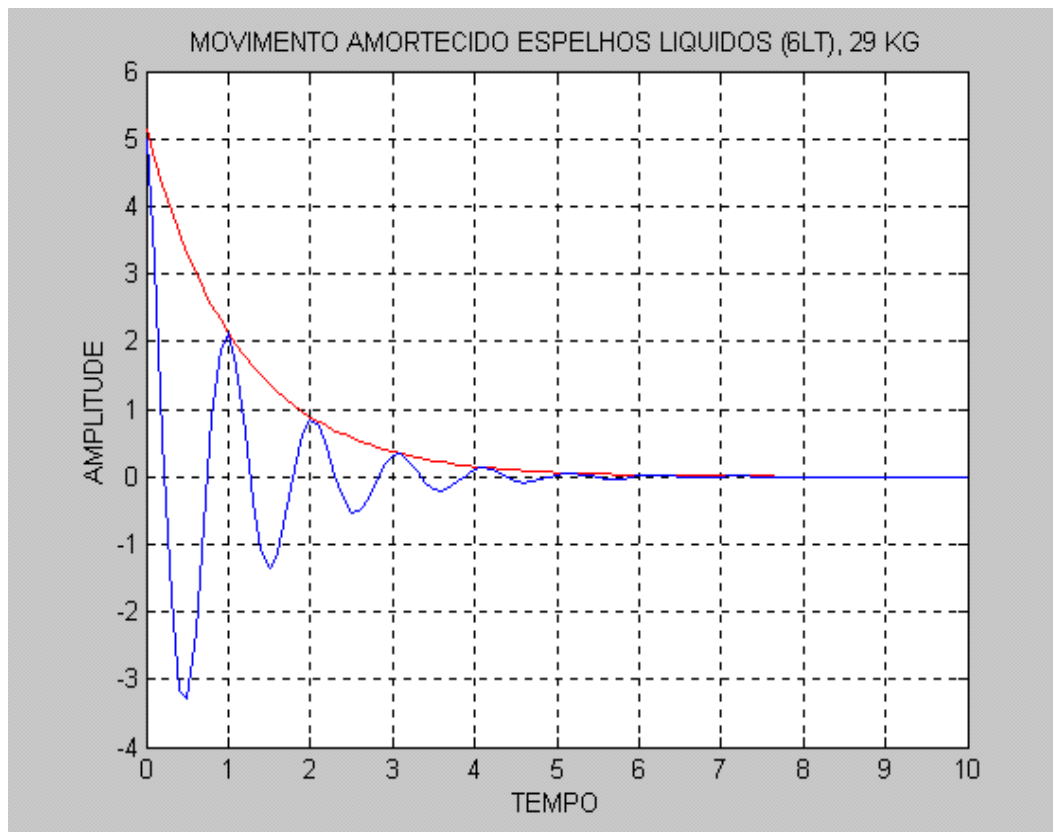


Fig. 17.30 – Movimento oscilatório do modelo com espelhos líquidos.

$T=1.041$ s
 $dl=0.9163$
 $ca=0.0.8802$
 $W=6.0357$ rad/s

$Wo=5.9712$ rad/s
 $fa=0.1474$
 $Vo=-11.4286$ m/s
 $\phi=-0.2288$ rad
 $m=29 + 6$ Kg

Seguidamente, mostra-se um quadro síntese das experiências de extinção de balanço no modelo, para diversas condições de carga:

	ξ <i>f.a.</i>	<i>GM</i> (<i>m</i>)	<i>f</i> <i>f.e.</i>	<i>K</i> (<i>m</i>)	<i>T</i> (<i>s</i>)	<i>W</i> (<i>Kg</i>)	<i>Wn</i> (<i>rad./s</i>)	$\xi \times Wn$ <i>fa x Wn</i>
s/ robaletes e s/ pesos	0,03	0,10	0,88	0,15	0,97	11	6,47	0,187
s/ robaletes e 8 pesos baixo	0,03	0,09	0,65	0,11	0,76	29	8,26	0,25
s/ robaletes e 4 pesos cima	0,02	0,04	0,84	0,14	1,37	20	4,58	0,092
c/ robaletes e s/ pesos	0,08	0,10	0,89	0,15	1,21	11	5,19	0,485
c/ robaletes e 8 pesos baixo	0,035	0,09	0,72	0,12	0,83	29	7,54	0,2262
c/ robaletes e 4 pesos cima	0,04	0,04	0,82	0,14	1,42	20	4,42	0,1592
c/ robaletes e 4 pesos cima + 4 pesos baixo	0,03	0,05	0,80	0,16	1,37	29	4,60	0,1197

$f_{\text{médio}} = 0,8$ (factor de estabilidade)

Quadro nº 17.4 - Síntese das experiências de extinção de balanço no modelo, para diversas condições de carga.

em que:

ξ – factor de amortecimento;

GM – altura metacêntrica;

f - factor de estabilidade;

K - raio de giração inercial;

T - período de adornamento;

W – deslocamento;

Wn- frequência angular natural de adornamento.

Consoante o valor do coeficiente de amortecimento é maior ou menor, assim a rapidez de decréscimo da amplitude de oscilação é maior ou menor, e pode atingir um valor crítico tal que o sistema nem sequer chegue a vibrar. Assim o movimento livre de um sistema amortecido é uma sinusóide de amplitude sucessivamente decrescente (factor de amortecimento menor que 1).

18- PROVAS DE EXTINÇÃO DE BALANÇO, NO NAVIO

18.1 - Testes de extinção de balanço em águas tranquilas (movimento amortecido livre)

Os testes no navio decorreram durante o mês de Abril de 2006 (cerca de 8 horas de testes). O navio principal aonde foram realizados os testes foi a Corveta “João Roby”, que faz parte de um conjunto de 7 navios similares (também foram realizados testes no Navio-Escola Sagres e nos navios hidrográficos da classe D. Carlos I).

Seguidamente mostra-se uma fotografia de uma Corveta, bem como as principais características de construção:



Deslocamento Standard	1400t
Comprimento	84,59m
Boca máxima	10,3m
Calado	3,58m
Pontal	6,20m
Velocidade Máxima	22nós

Fig. 18.1 – Características gerais das corvetas.

As condições iniciais do navio para a realização dos testes de extinção de balanço foram as seguintes:

- Imersão média = 3,30 m;
- Deslocamento médio = 1350 tons;
- Velocidade = 10 nós;
- Vento relativo = 5 nós;
- Mar: sem ondulação;
- Profundidade no local de testes: mais de 200m.

Antes de se retirar a curva de amortecimento de balanço, em águas tranquilas, colocou-se todo o leme a um bordo (25° de leme) de modo a provocar um adorno inicial ao navio, e, posteriormente colocou-se o leme a meio (0°). O rumo final do navio foi escolhido de modo a obter-se a menor influência possível do vento. O início da medição da oscilação em função do tempo, só teve lugar algum tempo depois do leme se encontrar a meio, e o rumo do navio estabilizar, de maneira a diminuir a taxa de erro por influência de vórtices produzidos pelo movimento de guinada do navio, assim como minimizar a influência do leme quando desviado da sua posição neutra.

A velocidade do teste (10 nós) foi a menor possível de modo a poder-se obter um adorno inicial capaz de produzir uma curva de amortecimento livre bem definida. É natural que a velocidade do navio influencie as características do movimento, apesar de, com esta velocidade, o número de Freud não ser apreciável.

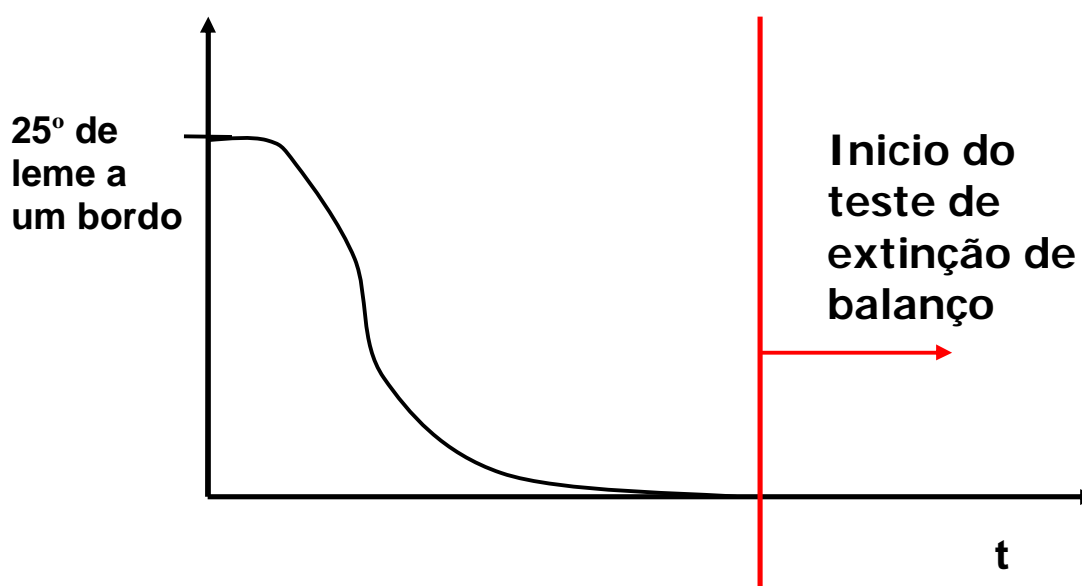


Fig. 18.2 – Sequência de acções para o teste de extinção de balanço no navio.

Neste tipo de testes pode-se obter a equação e características do movimento amortecido livre:

$$\phi(t) = A.e^{-\xi.W_n.t}.sen(W_a.t + \theta)$$

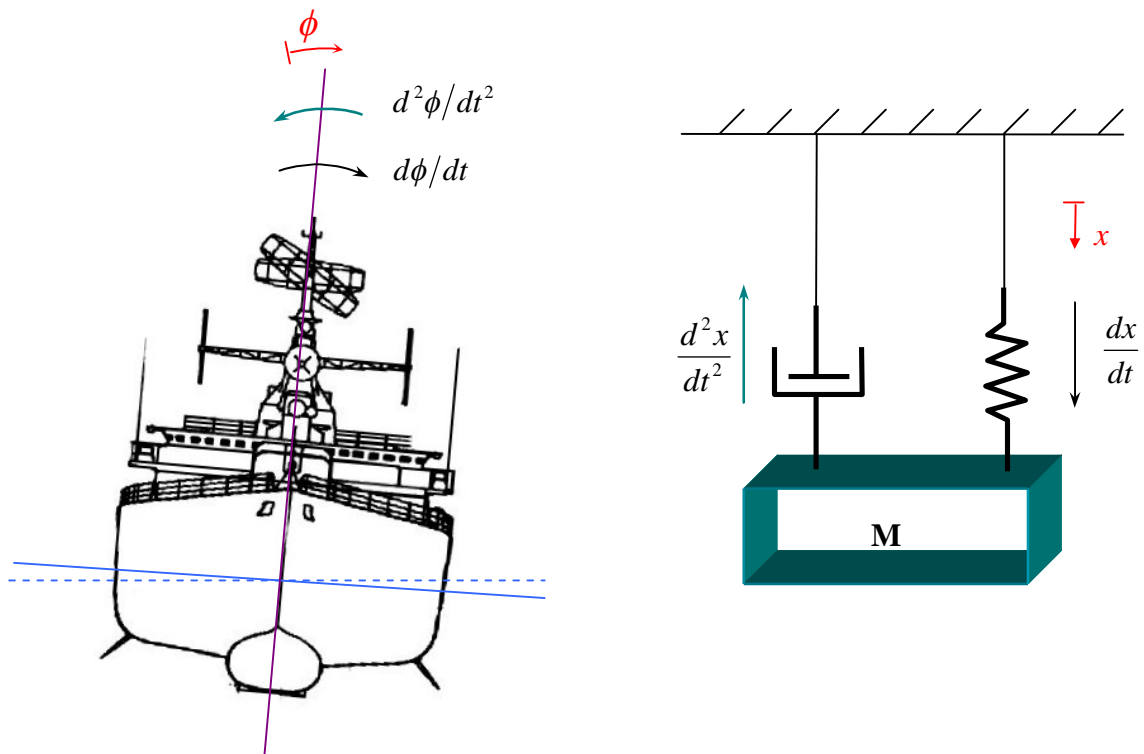


Fig. 18.3 – O navio com movimento amortecido livre (extinção de balanço).

Foram efectuados 10 testes de extinção de balanço em águas tranquilas, e o resultado médio obtido, com o auxílio do Matlab e utilização das FFT, foi o seguinte (para um deslocamento de 1350 tons):

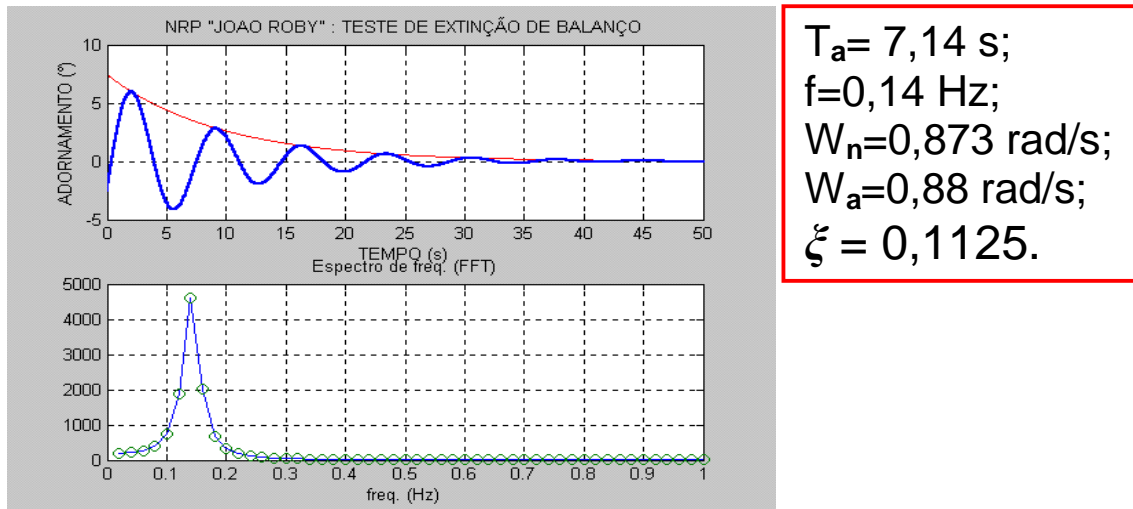


Fig. 18.4 – Movimento amortecido livre do NRP “João Roby”.

Ao se fazer uma extrapolação para outros deslocamentos, próximos do deslocamento de teste, e com recurso às provas de estabilidade do navio, obtém-se o seguinte quadro:

Wnavio (tons)	GMnavio (m)	T (s)	f (f. estabilidade)
1257	0,95	7,15	0,674
1290	0,84	8,04	0,713
1350,85	1,015	7,14	0,699
1387,24	1,046	7,06	0,698
1400	0,89	7,82	0,714

Quadro nº 18.1 - Altura metacêntrica (GM), período (T) e factor de estabilidade (f) em função do deslocamento, nas Corvetas.

Pela fórmula:

$$T \text{ (secs)} = \frac{f \times \text{Beam}}{\sqrt{GM}}$$

Retirou-se um factor de estabilidade médio de: $f_{\text{médio}} = 0,7$; para um nível de confiança = 95% e um erro máximo no cálculo da altura metacêntrica GM de 6,5%.

O Polinómio de interpolação, do 2º grau, de f em função de GM é igual a:

$$f = -0,34.GM^2 + 0,56.GM + 0,48$$

A equação do movimento (e a solução geral homogénea correspondente) é:

$$\phi(t)_{\text{navio}} = 7,46.e^{-0,104.t} .sen(0,88.t - 0,35)$$

18.2 - Testes em mar regular (movimento amortecido forçado)

Os testes deste tipo foram efectuados a seguir aos testes de extinção de balanço, e para o efeito foram escolhidos dias em que a ondulação era regular e com características semelhantes às características médias padrão de ondulação do Atlântico Norte, ou seja com um período de ondulação de cerca de 8 segundos, e com amplitude de cerca de 1m e de 2,5 m, como se pode observar pelos seguintes quadros:





Fig. 18.5 – Características médias padrão de ondulação do Atlântico Norte.

Neste tipo de testes pode-se obter a equação e características do movimento amortecido forçado:

$$\phi_{SG}(t) = \phi_{GH}(t) + \phi_P(t) = A.e^{-\xi.W_n.t}.sen(W_a.t + \theta) + U.sen(W_f.t - \varphi)$$

(SOLUÇÃO GERAL = SOL. GERAL EQUAÇÃO HOMOGÊNEA + SOL. PARTICULAR)

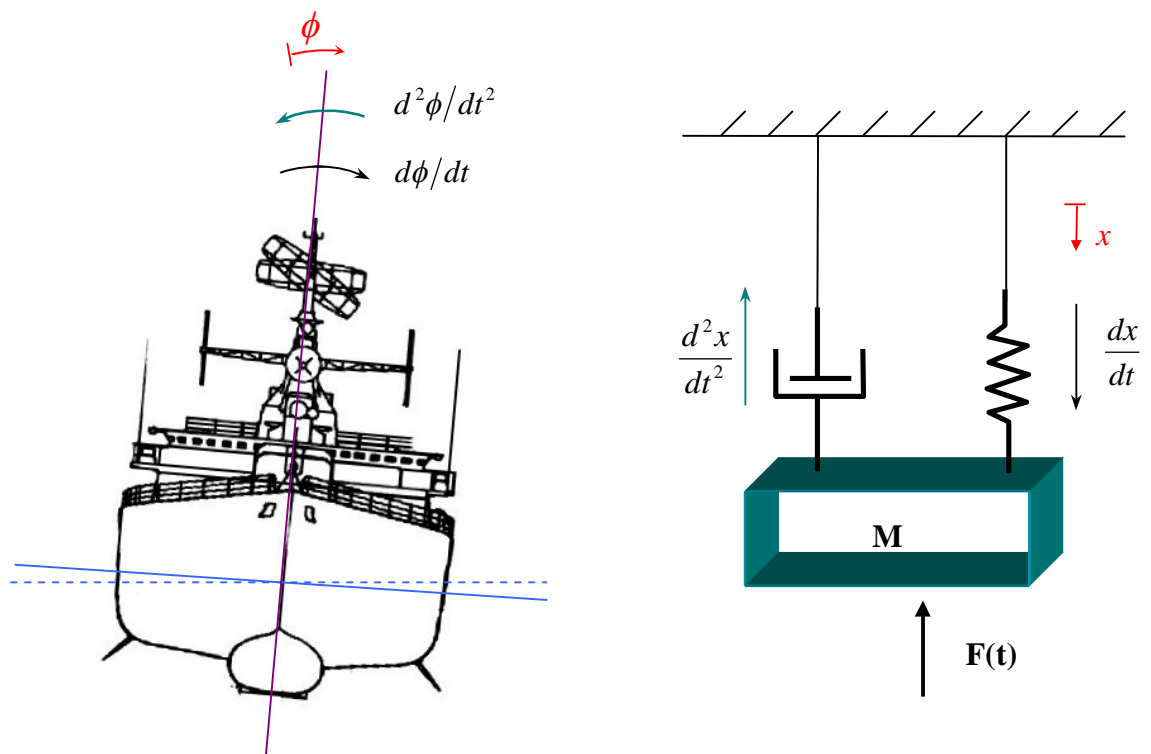


Fig. 18.6 – O navio com movimento amortecido forçado.

A solução particular é uma equação linear, não homogénea, de 2ª ordem a coeficientes constantes e a resposta do sistema depende do “modo particular” solicitado pela força exterior F (t). A cada tipo de F (t) excitadora corresponde uma solução particular da equação diferencial.

O seguinte gráfico, resultante das experiências a bordo do navio, e para um deslocamento de 1350 tons, demonstra precisamente o que se disse atrás:

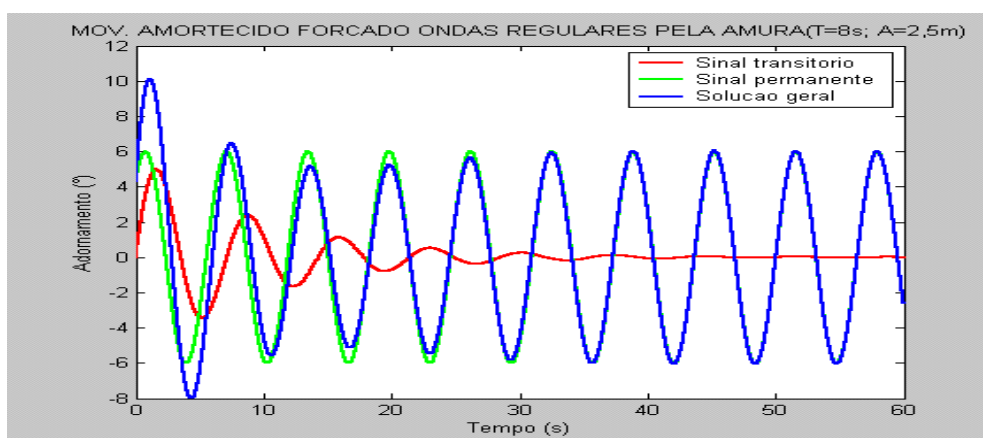


Fig. 18.7 – Movimento amortecido forçado do NRP “João Roby”.

O momento de excitação depende de uma frequência de encontro entre o navio e o sistema de ondas. Esta frequência de encontro ω_e , depende da velocidade do navio V , da frequência das ondas ω_w , e do ângulo de encontro entre a linha de proa do navio e a direcção de avanço das ondas μ .

$$\omega_e = \omega_w \left(1 - \frac{\omega_w V}{g} \cos \mu \right)$$

Fig. 18.8 – Frequência de encontro entre o navio e o sistema de ondas.

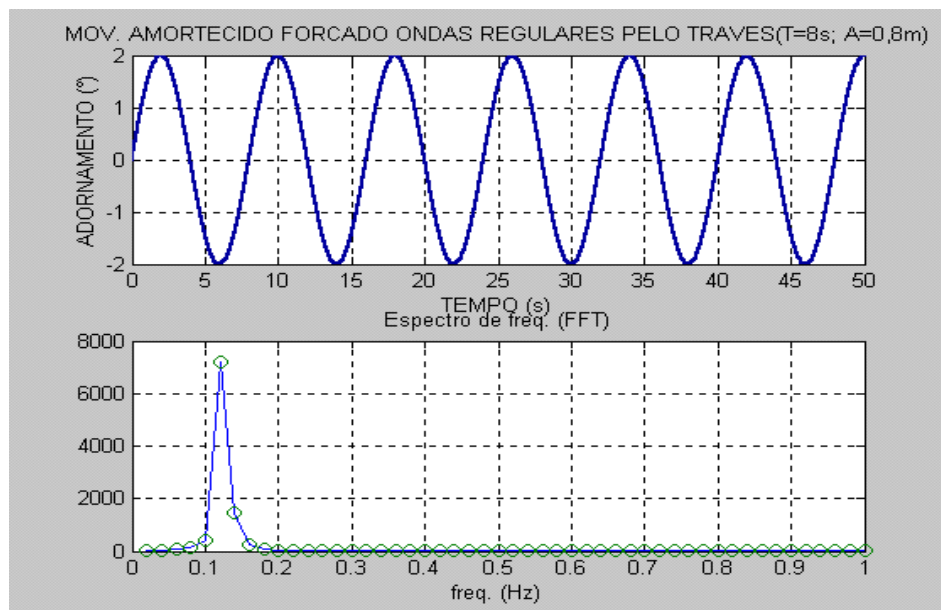
O desfasamento entre W_e e a resposta do navio é dado por:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{2 \cdot \xi \cdot r}{1 - r^2} \right)$$

E como a razão entre a frequência de encontro das ondas e a frequência natural de oscilação do navio é dada por:

$$r = W_e / W_n$$

Obtiveram-se as seguintes curvas do comportamento do navio, para um período de onda de 8 s e amplitudes de 0,8m e de 2,5m (velocidade do navio =10 nós):



($f=0,125\text{Hz}$; $T=8\text{s}$; $r = 0,89$ (oscilação lenta: r é menor do que 1))

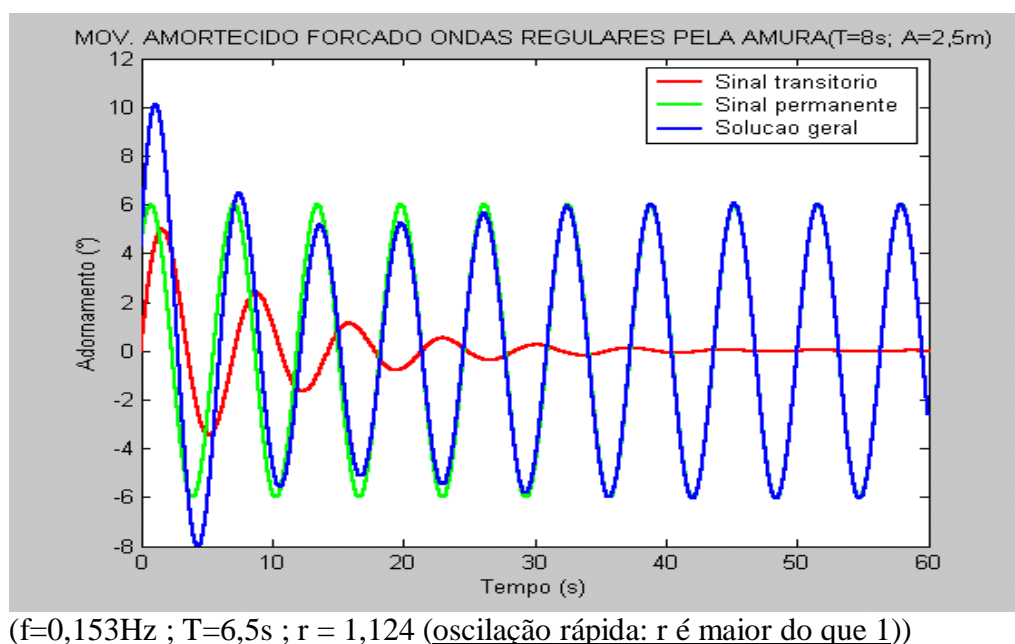
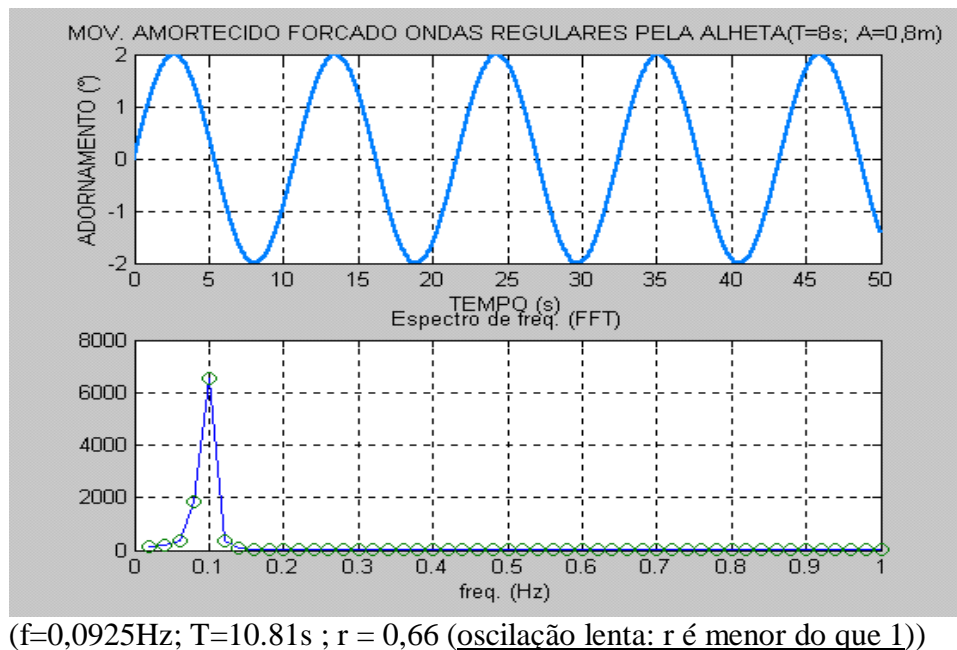


Fig. 18.9 – Movimentos amortecidos forçados com ondas regulares do NRP “João Roby”.

Para esta condição de carga do navio (1350 ton e GM=1,015m) e estas condições de mar (T=8s) a ressonância ocorre quando o **Ângulo entre navio e ondas** **= 110° ou 250°** (velocidade do navio =10 nós):

A: Factor de amplificação dinâmica

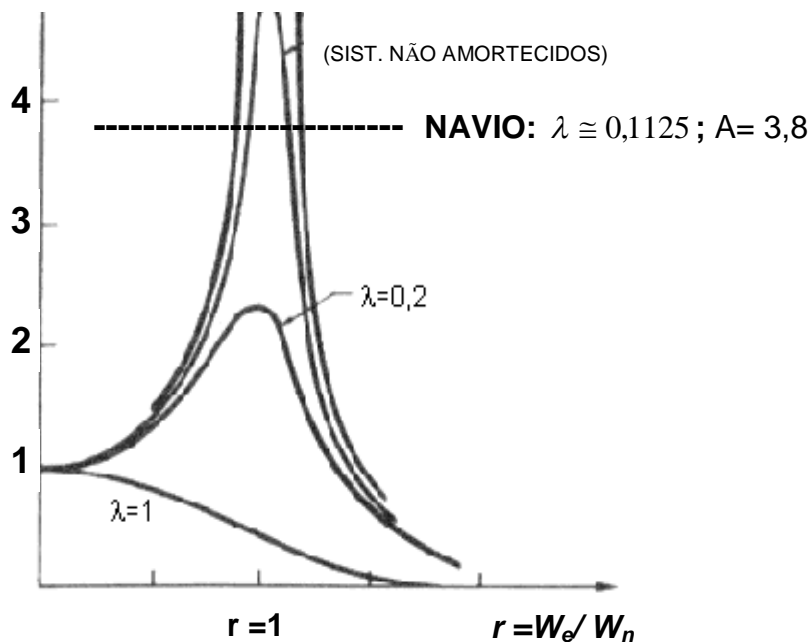
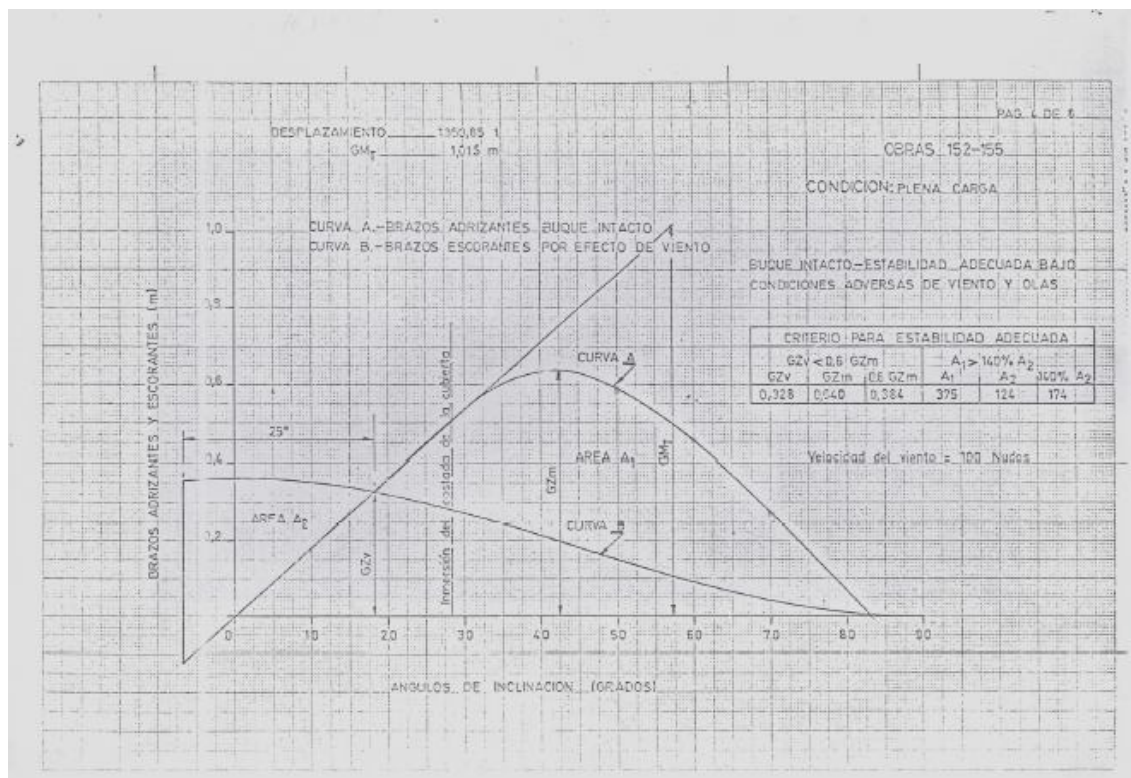


Fig. 18.10 – Curvas de ressonância do movimento amortecido forçado.



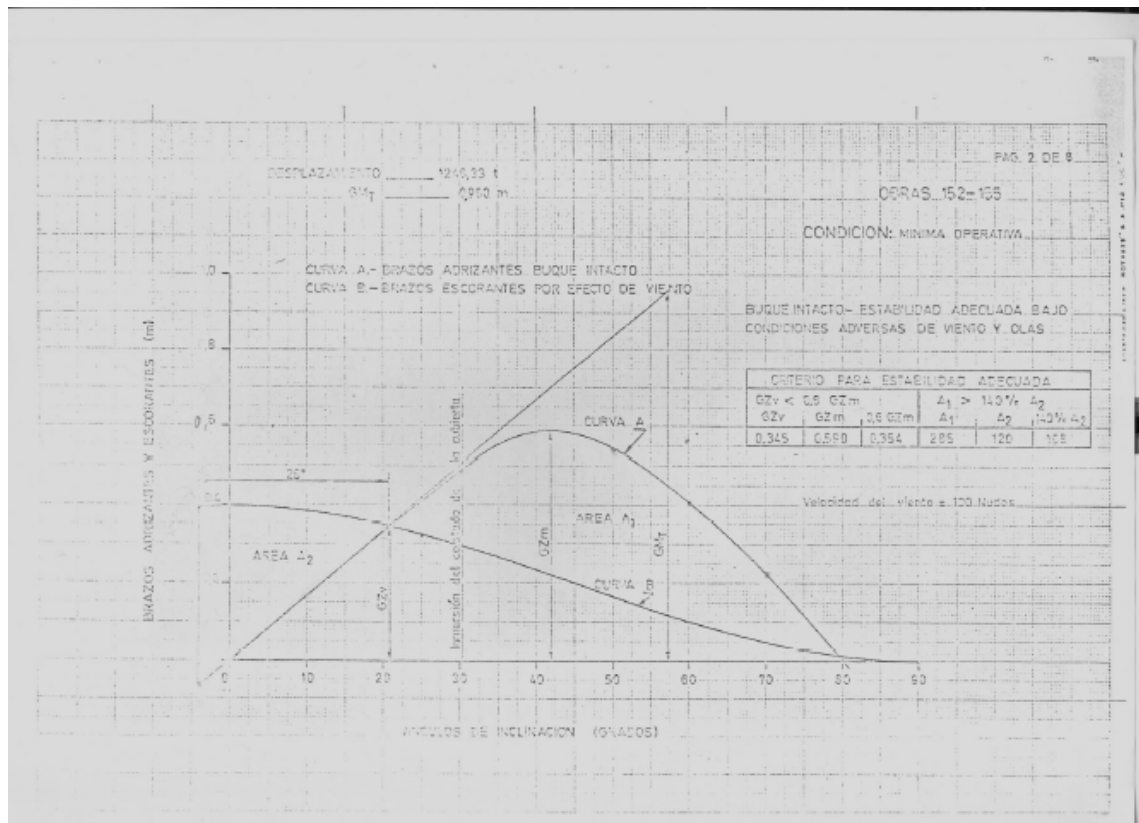


Fig. 18.11 – Curvas de estabilidade das Corvetas para as condições de carregado e de mínimo operativo.

19- CONCLUSÕES (e trabalho futuro)

As vibrações em navios ocorrem sempre que existam forças dinâmicas, isto é, forças que variam ao longo do tempo e que actuam no casco do navio e respectivos apêndices ou em determinados elementos estruturais. A resposta da estrutura do navio irá depender da intensidade das forças de excitação e das características da sua estrutura (inércia, amortecimento e rigidez).

O estudo do comportamento dinâmico de estruturas inicia-se pela análise numérica da resposta de sistemas mecânicos simples. A utilização de métodos numéricos para a resolução das equações diferenciais do equilíbrio, representa o tratamento mais geral que se pode dar a estes problemas, e é o único possível de aplicar no caso de problemas de grande complexidade (equações diferenciais não-

lineares). O cálculo numérico da resposta de sistemas mecânicos simples tem também a vantagem de realçar os parâmetros que influenciam o movimento, e de analisar em detalhe a variação da resposta no tempo, o que contribui para uma percepção do fenómeno.

Este trabalho começou pelo projecto e construção de um modelo de uma secção transversal de um navio, tendo sido usada como referência, a secção de maior boca do casco das corvetas.

O casco do modelo apresenta uma correcta e simétrica distribuição das massas, permanecendo em equilíbrio, não sendo verificado qualquer adorno ou caimento de construção.

O modelo foi todo construído em aço, permitindo uma maior resistência estrutural e durabilidade. O lastro é amovível sendo variável a posição do Centro de Gravidade, permitindo que o modelo possa ser utilizado para outros fins académicos.

Os robaletes do modelo também são amovíveis, permitindo que estes sejam retirados, e colocados qualquer outro tipo de apêndices de casco.

Os ensaios tiveram lugar no tanque do Laboratório de Arquitectura Naval, da Escola Naval, mostrando-se o local ideal para atingir os objectivos propostos para o presente trabalho. A praia existente na extremidade do tanque foi fundamental para dissipar as ondas geradas pelo movimento de balanço do modelo durante os ensaios de extinção de balanço.

O método de leitura e registo através do inclinómetro de precisão, permitiu uma excelente aquisição de dados, tendo sido obtidas em todos os ensaios de extinção de balanço, sinusoidais amortecidas bastante próximas do modelo teórico de balanço amortecido, em águas tranquilas.

Apresentaram-se os resultados para as experiências efectuadas, tendo sido, de uma forma global atingidos os objectivos do presente estudo. Foram comparados resultados entre experiências, e com valores previstos na fase de projecto, sendo atingidos resultados bastante satisfatórios.

Foi calculada a posição vertical do Centro de Gravidade, do modelo, através de três métodos diferentes, estando os valores obtidos relativamente próximos. O valor da posição vertical do Centro de Gravidade que foi assumido para o modelo, foi o obtido na Prova de Estabilidade, e este valor serviu como referência, para determinar o ponto de fixação no modelo do sistema de amarração.

Foram efectuadas Provas de Extinção de Balanço, para o modelo com e sem robaletes, e para diferentes condições de carga, sendo apresentados os registos das provas e as Curvas de Extinção de Balanço. Foi também calculado e apresentado, entre outros parâmetros, o factor de amortecimento através do método do decremento logarítmico, e determinadas as respectivas equações do movimento para cada condição de carga, com e sem robaletes.

Tal como já era esperado, o modelo com os robaletes apresenta um maior coeficiente de amortecimento, tendo sido bastante perceptível a influência destes no amortecimento do balanço, não só pelos resultados obtidos, mas também pelo comportamento do modelo durante as provas de extinção de balanço.

A escolha de um período natural adequado, o bom dimensionamento dos robaletes e do modelo, contribuíram muito, para que o modelo tivesse esse comportamento, tendo os robaletes conseguido aumentar, em média, cerca de 45% o coeficiente de amortecimento do modelo.

As Curvas de Extinção de Balanço foram uma excelente referência para verificar o comportamento do modelo nas duas situações, sendo visível uma diferença expressiva entre as curvas do modelo sem robaletes com as curvas do modelo com robaletes.

O efeito de amortecimento aumenta com a área do robalete, bem como, com a distância entre o robalete e o eixo do movimento de balanço (é neste eixo que se situa o centro de gravidade do navio). Os robaletes são mais eficazes para grandes ângulos de balanço.

O efeito do robalete é inversamente proporcional ao momento de inércia do navio segundo o eixo do movimento do balanço (eixo dos xx).

Verifica-se que o período de balanço aumenta ligeiramente com o amortecimento, contudo, este aumento é muito pequeno visto que o amortecimento é muito pequeno no movimento de balanço.

Através da análise das curvas dos gráficos tempo-adornamento, em anexo D, constata-se, essencialmente, que:

- para as mesmas condições de carga (mesmo deslocamento e similar altura do centro de gravidade) o período de balanço é sensivelmente igual, mas o coeficiente de amortecimento é maior para o caso do modelo com robaletes;
- para o mesmo deslocamento, mas diferentes alturas do centro de gravidade, quanto menor for a altura do centro de gravidade, menor é o período de balanço e maior o coeficiente de amortecimento (e vice-versa).

Verificou-se, ainda, que uma das características mais importantes de qualquer oscilador harmónico: o período de oscilação, não depende da amplitude da oscilação (do adornamento). Assim, tanto para pequenas quanto para grandes amplitudes de adornamento, o período de balanço permanece o mesmo (o que varia é a velocidade linear de reposição, que depende do momento endireitante).

Consoante o valor do coeficiente de amortecimento é maior ou menor, assim a rapidez de decréscimo da amplitude de oscilação é maior ou menor, e pode atingir um valor crítico tal que o sistema nem sequer chegue a vibrar. Assim o movimento livre de um sistema amortecido é uma sinusóide de amplitude sucessivamente decrescente (factor de amortecimento menor que 1).

Durante este trabalho constata-se que a altura metacêntrica transversal de um navio, GM, pode ser calculada em tempo real, a partir do período de balanço transversal, por intermédio da utilização de um inclinómetro de precisão.

A determinação da altura metacêntrica GM de um navio revela-se de grande importância como medida da estabilidade estática, pois é um factor que mede a

resposta do navio quando sujeito a cargas dinâmicas. Quando o navio está no mar, ele é sujeito à acção das ondas marítimas assim como do vento, que causam movimentos de adornamento, arfagem e cabeceio, ou uma combinação infinita destes movimentos, em que o movimento resultante pode ser bastante severo.

Como resultado, a medição dinâmica do GM, bem como do adornamento do navio, torna-se útil para a avaliação, em tempo real, da segurança do navio, das pessoas e da carga a bordo.

O cálculo dinâmico do GM pode obter-se através da leitura do período de adornamento T, utilizando para o efeito a análise matemática por FFT (*fast fourier transformers*), com recurso a *software* próprio, como por exemplo, o MATLAB.

Ou seja, o valor calculado de GM corresponde ao valor real do navio, para a condição de carga na altura, tendo em linha de conta a quantidade de combustível, de aguada e de lastro no momento.

Sempre que se altera a condição de estabilidade estática de um navio, através da adição/remoção de pesos a bordo e/ou da alteração da quantidade de líquidos, a altura metacêntrica GM altera-se; e com isso a estabilidade residual do navio.

A medição em tempo real da oscilação do navio pode revelar-se bastante útil quando o período de cabeceio for praticamente igual a $\frac{1}{2}$ do período de adornamento, o que significa, genericamente, que o navio enfrenta, longitudinalmente, ondas com o dobro da frequência do período de adornamento, e é bem provável que o navio entre em ressonância, com todas as consequências que daí advém, tornando-se necessário tomar medidas evasivas tais como a mudança de rumo e/ou de velocidade do navio.

Com o acesso a determinados dados sobre cada classe de navios, como por exemplo, informação sobre as curvas de estabilidade iniciais de projecto para diversas condições de carga, com e sem acção do vento, informação sobre a compartimentação, e dos critérios de estabilidade para o tipo de navios em estudo, é possível, com este processo, redesenhar as curvas de estabilidade (adornamento vs braço endireitante), e assim determinar a reserva de estabilidade transversal disponível. Este tipo de sistema de instrumentação poderá, também, ajudar e complementar as provas de estabilidade (ou mesmo diminuir a sua periodicidade), e que poderá traduzir-se numa economia dos recursos financeiros.

Em termos de trabalho futuro, podem-se realizar testes e análises dinâmicas, em tempo real, e a bordo dos navios, através da utilização de diversos sensores de distância, colocados ao longo do costado do navio (com a mesma base de tempo do inclinómetro de dois eixos) de modo a medir-se os calados instantâneos, e que permitirá:

- a) a obtenção instantânea da área de flutuação, e o cálculo do raio metacêntrico e da altura metacêntrica transversal e longitudinal;
- b) a determinação do deslocamento real do navio através da obtenção dos calados e imersões;
- c) a obtenção do valor aproximado do alquebramento do navio durante as manobras de carga/descarga de pesos sólidos e/ou líquidos.

BIBLIOGRAFIA

BHATTACHARYYA, Rameswar, *Dynamics of Marine Vehicles*. Wiley-Interscience, 1978.

D’OLIVEIRA, Rogério S., *Elementos de Arquitectura Naval*, Escola Naval, Edição de 2001.

GOLDEBERG, Lawrence L., *Principles of Naval Architecture*. Vol. I, Capítulo de Estabilidade, 1981.

MANNING, George C., *Principles of Naval Architecture*. Vol. II, Capítulo de Dinâmica, 1982.

RAWSON, K. J. e TUPPER, E. C., *Basic Ship Theory*. Longman, Vol. III, 3ª Edição, 1984.

SOARES, Carlos Guedes, *Teoria do Navio - Apontamentos de Mecânica do Navio*, 1988.

FILHO, Avelino Alves, *Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE, Análise Dinâmica*. Editora Érica, 2005.

RHODES, Martin A., *Ship Stability for Mates/Masters*, Seamanship International Ltd, 2003.

ANEXO A

Características do inclinómetro utilizado nas experiências (CXTILTO2E da Crossbow)

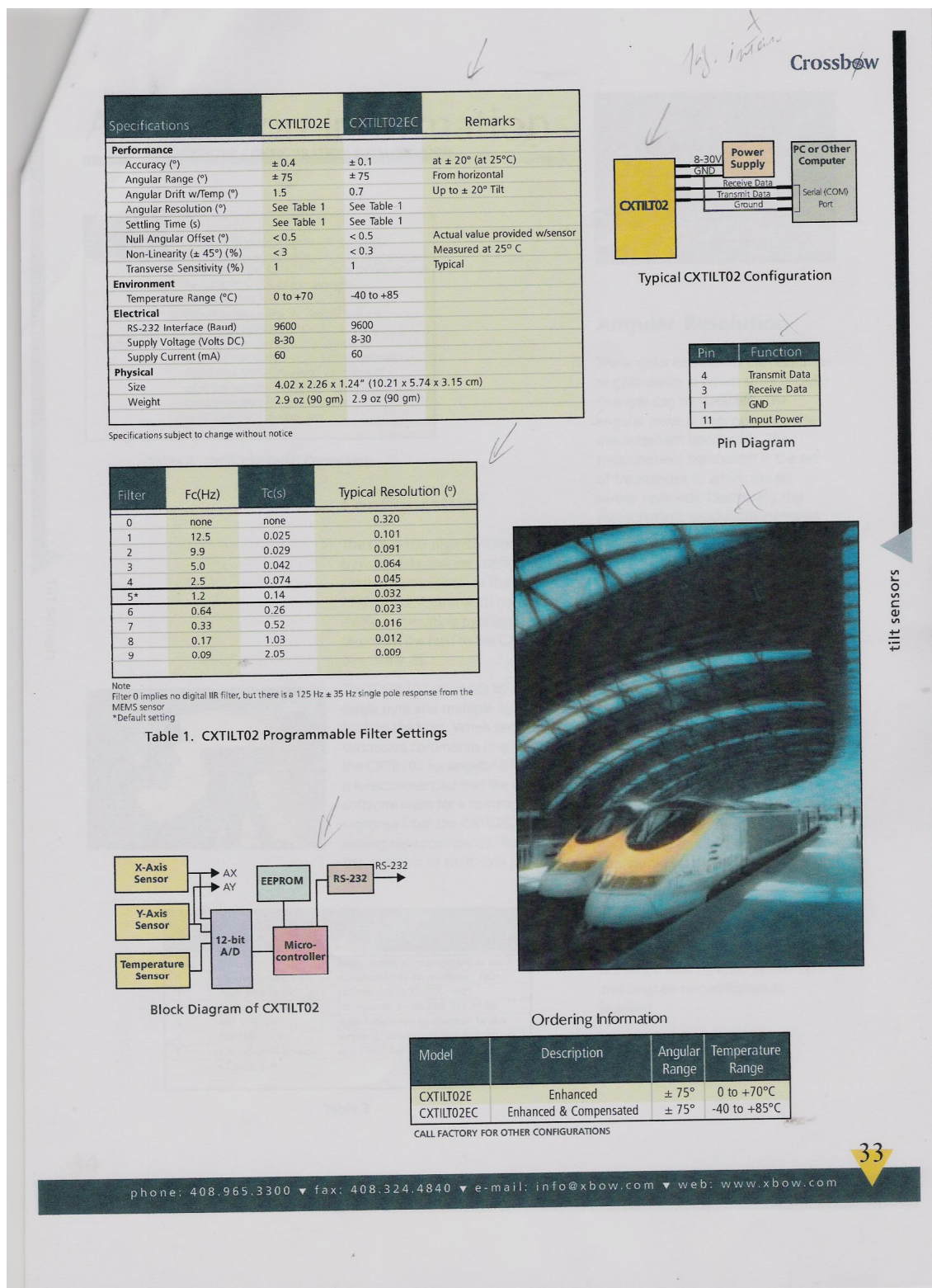


Fig. A.1 – Características do inclinômetro utilizado nas experiências.

ANEXO B

Movimento Harmónico Simples e movimento oscilatório amortecido

ANEXO B – Movimento Harmónico Simples e Movimento oscilatório amortecido

Movimento Harmónico Simples

1- Movimento Harmónico Simples (MHS) como projecção do Movimento circular Uniforme (MCU)

Oscilar significa mover-se de um lado para outro, movimentar-se alternadamente em sentidos opostos, mover-se, tornando a passar (ao menos aproximadamente) pelas mesmas posições. Assim, uma partícula que se movimenta para a frente e para trás, ao redor de um ponto dado, possui um movimento oscilatório. Periódico significa que se repete com intervalos regulares. Assim, uma partícula que se movimenta de modo que, em intervalos de tempos iguais, o movimento se repete identicamente, tem um movimento periódico. Uma partícula que se movimenta para a frente e para trás, ao redor de um ponto fixo, e para a qual o movimento se repete identicamente em intervalos de tempo iguais, está com um movimento periódico oscilatório. O movimento harmónico simples (MHS) é um tipo particular de movimento periódico oscilatório em que a partícula se move sobre uma recta em que a intensidade da força que tende a levá-la ao ponto fixo cresce na mesma proporção em que aumenta o seu afastamento deste mesmo ponto fixo. O movimento harmónico simples pode ser visto como a projecção ortogonal do movimento circular uniforme (MCU) sobre qualquer recta. Por exemplo, se uma partícula descreve um MCU num plano vertical, a sombra da partícula descreve um MHS sobre uma linha vertical.

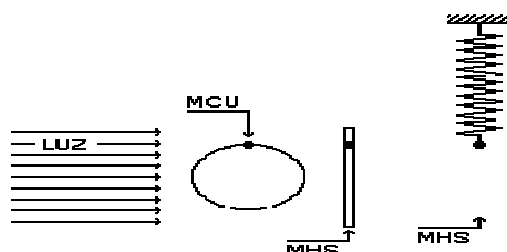


Fig. B.1- Movimento Harmónico Simples (MHS) e Movimento Circular Uniforme (MCU).

2-Alongamento e Amplitude

Á distância x , que vai do ponto fixo ao redor do qual a partícula oscila, ponto esse tomado como origem do eixo X , até a posição da partícula, é chamada, no MHS, de alongamento. Os alongamentos no mesmo sentido do eixo X são considerados positivos e no sentido contrário, negativos. A distância A , que vai da origem do eixo X até o ponto de retorno associado ao alongamento máximo da partícula, é chamada de amplitude. Observe que a amplitude do MHS é igual ao raio da trajectória da partícula no MCU correspondente.

3- Relações Matemáticas

Se os pontos P e Q (Fig.(a), abaixo) coincidem em $t = 0$, o ângulo do segmento OQ com o eixo X no instante posterior t é $\theta = \omega t$, onde ω representa o módulo da velocidade angular do MCU. Então, $\cos \omega t = x/A$ ou:

$$x(t) = A \cos \omega t$$

onde x é o alongamento, ω a frequência angular e A , a amplitude (alongamento máximo) da partícula em MHS.

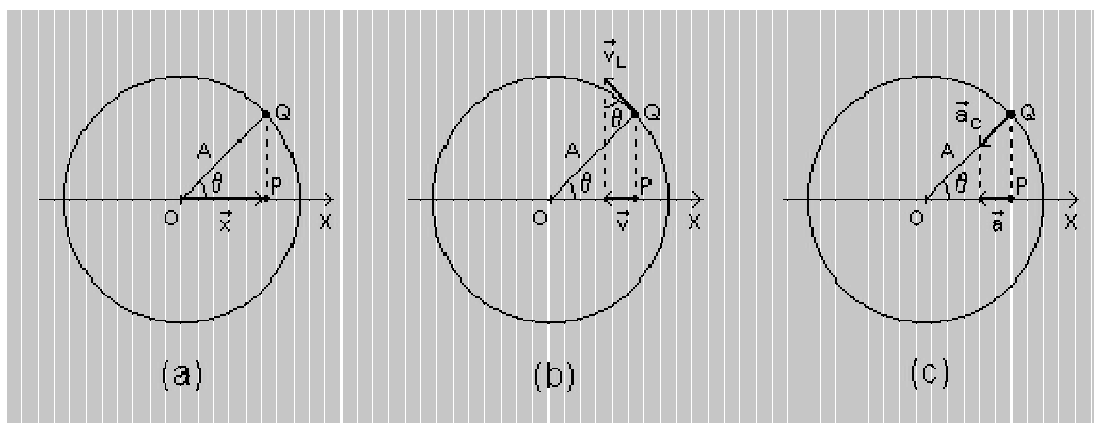


Fig. B.2 – Movimento circular uniforme.

O módulo da velocidade linear do ponto Q em MCU é $V_L = A\omega$ e o módulo da velocidade do ponto P em MHS (Fig.(b)) é $V(t) = - V_L \sin \omega t$ ou:

$$v(t) = - A\omega \sin \omega t$$

O sinal negativo justifica-se da seguinte maneira. Para $0 < \omega t < \pi$, $\sin \omega t > 0$,

e o vector velocidade tem o sentido oposto àquele escolhido para o eixo X. Para $\pi < \omega t < 2\pi$, $\sin \omega t < 0$, o vector velocidade tem o mesmo sentido daquele escolhido para o eixo X. Assim, para qualquer ângulo ωt , ou seja, em qualquer instante de tempo considerado, a função $\sin \omega t$ tem o sinal contrário ao da velocidade.

O módulo da aceleração centrípeta do ponto Q em MCU é dada por $a_C = V_L^2/A = A\omega^2$ e o módulo da aceleração do ponto P em MHS (Fig.(c)) por $a(t) = -a_C \cos \omega t$ ou :

$$a(t) = -A\omega^2 \cos \omega t$$

O sinal negativo introduzido justifica-se de modo análogo ao da velocidade. As expressões matemáticas deduzidas valem para o caso em que os pontos Q e P coincidem em $t = 0$, ou seja, valem para o caso em que $x(t = 0) = A$. Por outras palavras, as expressões valem para o caso particular em que a partícula começa a ser observada (quando $t = 0$), ou seja quando se encontra no ponto correspondente ao alongamento máximo ($x = A$). O caso mais geral, em que a partícula está em qualquer posição genérica quando começa a ser observada, pode ser descrito escrevendo-se:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \cos (\omega t + \delta) \\ v(t) &= -A\omega \sin (\omega t + \delta) \\ \text{e:} \quad a(t) &= -A\omega^2 \cos (\omega t + \delta) \end{aligned}$$

Onde δ , a fase inicial, é tal que $x(t = 0) = A \cos \delta$, ou seja, prevê o caso em que o alongamento inicial [$x(t = 0)$] é diferente do alongamento máximo (A).

4- Definição de MHS

Para uma definição de MHS independente do MCU devemos observar que, das expressões deduzidas acima para o alongamento e para o módulo da aceleração, vem $a = -\omega^2 x$. Multiplicando os dois lados da igualdade pela massa m da partícula e levando em conta a segunda lei de Newton, obtemos:

$$\begin{array}{l} F = ma \\ F = m(-\omega^2 x) \\ \mathbf{F} = -\mathbf{C}\mathbf{x} , \\ \text{Com } \mathbf{C} = m\omega^2 \end{array}$$

Aqui, F representa o módulo da força resultante sobre a partícula. Assim, uma partícula está em MHS quando se move sobre uma recta sob o efeito de uma força cujo módulo é proporcional ao afastamento da partícula de um ponto fixo sobre esta recta e dirigida para esse ponto. Uma força que, actuando sobre uma partícula, tem a propriedade de estar sempre dirigida a um certo ponto fixo, é chamada de força restauradora. A força que governa o MHS é uma força restauradora cujo módulo é proporcional ao afastamento da partícula do ponto fixo considerado.

5- Período e Frequência

O período é o intervalo de tempo necessário para completar uma oscilação. Assim, simbolizando o período por T, da definição de período temos:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t + T)$$

ou seja, $A \cos \omega t = A \cos [\omega (t + T)]$. Como $\cos \alpha = \cos (\alpha + 2\pi)$, temos

$$\omega T = 2\pi \quad \text{ou:}$$

$$T = 2\pi / \omega$$

Aqui aparece uma das características mais importantes de qualquer oscilador harmónico: o período de oscilação não depende da amplitude. Assim, tanto para pequenas quanto para grandes amplitudes, o período de um dado oscilador harmónico permanece o mesmo. Esta independência do período para com a amplitude torna qualquer oscilador harmónico ideal para servir de base na construção de relógios já que o ritmo de andamento dos ponteiros não se altera por pequenas mudanças acidentais na correspondente amplitude de vibração. Por isso, praticamente todos os relógios modernos estão baseados num tipo ou noutro de oscilador harmónico.

A frequência é o número de oscilações realizadas por unidade de tempo. Então, simbolizando a frequência por f , temos:

$$f = 1/T \quad \text{ou} \quad f = \omega/2\pi$$

6- Pêndulo Simples

O pêndulo simples consiste numa partícula de massa m suspensa por um fio sem massa e inextensível de comprimento L . A partícula oscila se for afastada da posição de equilíbrio, sobre a linha vertical que passa pelo ponto de suspensão, e abandonada. Para pequenas amplitudes, a partícula descreve um MHS.

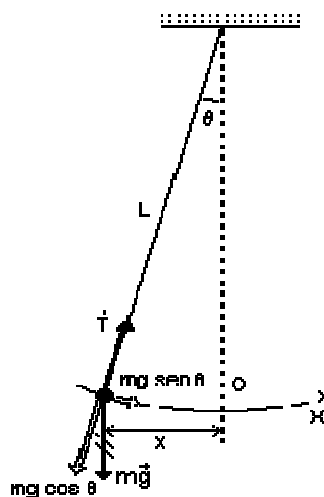


Fig. B.3 – Movimento pendular.

Ignorando a resistência do ar, as forças que atuam sobre a partícula são a força peso, exercida pela Terra, e a tensão, exercida pelo fio. Como o fio é inextensível, a componente do peso ao longo do fio cancela a força de tensão.

A resultante das forças que atuam sobre a partícula é, portanto, a componente do peso na direcção do movimento da partícula, cujo módulo vale: $m \cdot g \cdot \sin \theta$.

A partícula do pêndulo descreve um arco de circunferência. Mas, se a amplitude do movimento é muito menor que o comprimento do fio, ou seja, se o ângulo θ é pequeno, podemos aproximar o arco por um segmento de recta horizontal sobre o qual fixamos o eixo X , com origem O onde a vertical tirada do ponto de

suspensão do pêndulo corta esse eixo. Então, fazendo $\sin \theta = x/L$, o módulo da força resultante sobre a partícula é de:

$$F(x) = - (mg/L) x$$

O sinal negativo aparece porque a força resultante aponta na mesma direcção que aquela escolhida como positiva para o eixo X quando o deslocamento é negativo e na direcção oposta quanto o deslocamento é positivo.

Assim, se o movimento da partícula se restringir a pequenas amplitudes, podemos considerar que ele segue uma recta (o eixo X) e sob o efeito de uma força cujo módulo é proporcional ao afastamento da partícula de um ponto fixo sobre esta recta (o ponto O) e dirigida para esse ponto. Por outras palavras, para pequenas amplitudes, o movimento da partícula que faz parte do pêndulo é um MHS. Por outro lado, o módulo da força que atua sobre a partícula em MHS é dado genericamente por $F = - Cx$ com $C = m\omega^2$, e o período pela fórmula:

$$T = 2 \pi / \omega.$$

Comparando aquela expressão para a força com a última expressão para o pêndulo simples, temos $C = mg/L$ e $\omega^2 = g/L$, ou seja:

$$T = 2 \pi [L/g]^{1/2}$$

Como $f = 1/T$, a frequência do movimento do pêndulo é dada por:

$$f = [g/L]^{1/2} / 2 \pi$$

Assim, dado L, o comprimento do pêndulo, e g, o módulo da aceleração gravitacional local, e caso não seja forçado por qualquer outro agente externo além da força gravitacional, o pêndulo só pode oscilar com a frequência dada pela fórmula acima. Essa frequência característica do pêndulo é chamada frequência própria ou frequência natural de oscilação.

Como se disse, uma das características importantes de qualquer oscilador harmónico é que o período de oscilação não depende da amplitude do movimento. Aqui reaparece esta característica uma vez que a partícula do pêndulo simples

descreve um MHS para pequenas amplitudes. Neste contexto, esta característica constitui o que se chama de lei do isocronismo.

No caso de amplitudes não muito pequenas, o pêndulo torna-se um oscilador não harmónico, a força restauradora não é proporcional ao deslocamento medido a partir da posição de equilíbrio e o período passa a depender da amplitude.

Quando a amplitude é muito menor que o comprimento do fio, o período do pêndulo simples é independente da amplitude do movimento porque a força de restituição que atua sobre a partícula pode ser considerada proporcional a θ (ângulo entre o fio e a vertical). No caso em que a amplitude não é tão pequena, deve-se levar em conta que a força de restituição não é proporcional a θ , mas a $\sin \theta$. E como $\sin \theta < \theta$ (se θ é diferente de zero), a força de restituição, nesse caso, é menor do que no caso anterior, qualquer que seja a posição da partícula e, portanto, também a sua aceleração é menor. Assim, a partícula demora mais tempo para completar uma oscilação e o período é maior (caso dos navios).

7- Pequenas Amplitudes

Escrever $\sin \theta = x/L$ significa tomar, implicitamente, $\sin \theta = \theta$. Esse resultado é verdadeiro para θ pequeno e em radianos. Para entender o porquê dos radianos deve-se considerar que, por definição, o ângulo entre dois segmentos de recta é dado em radianos pelo seguinte procedimento: com centro no ponto de cruzamento dos segmentos de recta, traça-se um arco de circunferência entre esses segmentos com raio R qualquer, e medindo-se o comprimento S do arco, o ângulo procurado é definido por $\theta = S/R$. Assim, voltando ao pêndulo simples, para ângulos pequenos, o arco de circunferência que representa a trajectória da partícula confunde-se com o segmento de recta de comprimento x e podemos escrever, pela definição de ângulo em radianos, $\theta = x/L$. Assim, $\sin \theta = \theta = x/L$, que é a expressão usada.

θ (graus)	θ (rad)	$\sin \theta$	$[\theta - \sin \theta]/\sin \theta$ (%) (erro)
10	0,175	0,174	0,575

15	0,262	0,259	1,158
20	0,349	0,342	2,047
25	0,436	0,423	3,073
30	0,524	0,500	4,800
35	0,611	0,574	6,446

Quadro nº B.1 – Seno de um ângulo pequeno (em radianos).

Por outro lado, escrevendo $\theta = x/L$ estamos a aproximar o arco de circunferência que constitui a trajectória da partícula por um segmento de recta. Este procedimento é tão mais exacto quanto menor for a amplitude do movimento da partícula. Em termos matemáticos, aproximar o arco pelo segmento de recta significa tomar o seno do ângulo entre o fio e a vertical como o próprio ângulo (em radianos). A tabela acima dá uma ideia do erro relativo cometido nesse procedimento.

8- Determinação da Aceleração Gravitacional

Com o uso de um pêndulo simples podemos determinar o valor da aceleração gravitacional local. Tomando um pêndulo simples de 1 m de comprimento, por exemplo, e medindo o tempo Δt levado para que ele complete 10 oscilações, temos:

$$g = L [2\pi / T]^2 = (1 \text{ m})[20\pi / \Delta t]^2 = 3.948 \text{ m}/(\Delta t)^2$$

e se $\Delta t = 20 \text{ s}$, por exemplo, vem: $g = 3.948 \text{ m}/(20 \text{ s})^2 = 9,87 \text{ m/s}^2$

Um modo de aumentar a precisão da experiência é aumentar o número de oscilações para a medida do tempo Δt , de modo que qualquer imprecisão nesta medida tem o seu efeito no cálculo de g reduzido na mesma proporção. Para poder aumentar o número de oscilações, a resistência do ar deve ser minimizada, já que tende a reduzir a amplitude das oscilações. Um modo de reduzir o efeito da resistência do ar é reduzir o volume do corpo que vai constituir o pêndulo sem reduzir, na mesma proporção, a sua inércia. Assim, uma pequena esfera de aço ou de chumbo torna-se bastante adequada. De qualquer modo, como o período de oscilação é independente da amplitude, esse efeito da resistência do ar não influencia

o resultado final e limita, apenas, o número de oscilações que pode ser tomado na medida de Δt .

9- Sistema Corpo-Mola

Consideremos um corpo de massa m que se apoia sobre uma superfície horizontal sem atrito e está preso a uma mola (de massa desprezível) de constante elástica k . Se o corpo é abandonado com a mola esticada ou comprimida, ele passa a mover-se horizontalmente sob o efeito da força de restituição da mola, executando um MHS.

Sobre o corpo existem três forças: a força peso, a força normal e a força da mola. Como as forças peso e normal cancelam-se mutuamente, a força resultante sobre o corpo é a própria força que a mola exerce sobre ele. O módulo dessa força é:

$$F = - kx$$

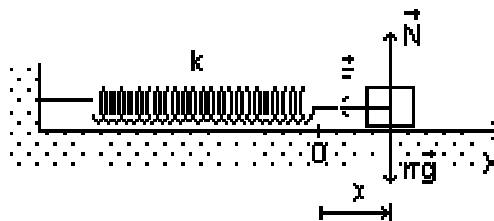


Fig. B.4 – Sistema corpo-mola.

onde x representa a distensão da mola, ou seja, o quanto ela foi esticada ou comprimida além do seu comprimento de equilíbrio, e k a chamada constante elástica da mola, que representa a dureza da mola. Pela lei de Hooke, k é constante. Comparando esta expressão com a expressão genérica do módulo da força que actua sobre a partícula em MHS, $F = - Cx$ com $C = m\omega^2$, temos $k = m\omega^2$.

E como $T = 2\pi / \omega$, temos, para o período do MHS descrito pelo corpo ligado à mola:

$$T = 2\pi [m/k]^{1/2}$$

Logo, quanto maior a massa da partícula, maior o período. E quanto mais dura a mola, menor o período. Estas mesmas conclusões podem ser estabelecidas levando em conta que o módulo da força exercida pela mola sobre o corpo depende da distensão da mola e da sua constante elástica. Assim, se o corpo é substituído por outro, de massa maior, mantendo-se a mesma distensão da mola, a força sobre o segundo corpo será a mesma que aquela sobre o primeiro, mas, pela segunda lei de Newton, a aceleração instantânea do segundo corpo será menor do que a aceleração instantânea do primeiro. E isso é verdade para qualquer distensão da mola. Portanto, como a amplitude do movimento é a mesma nos dois casos, o corpo de massa maior, tendo sempre aceleração instantânea menor, levará mais tempo para descrever uma oscilação completa, ou seja, terá período maior. Por outro lado, se a mola é substituída por outra, de constante elástica maior, mantendo-se o mesmo corpo e a mesma distensão da mola, a força sobre o corpo será maior e, pela segunda lei de Newton, a sua aceleração instantânea será, também, maior do que antes. E isso é verdade para qualquer distensão da mola. Assim, como a amplitude do movimento é a mesma nos dois casos, o corpo ligado à mola de constante elástica maior, tendo sempre aceleração instantânea maior, levará menos tempo para descrever uma oscilação completa e, portanto, terá período menor [Filho, Alves (2005)].

A frequência do movimento do corpo preso à mola é:

$$f = [k/m]^{1/2} / 2\pi$$

$$f=1/T =1/ (2 \pi [m/k]^{1/2})$$

Assim, dada a massa m do corpo e k , a constante elástica da mola, e caso o corpo não seja forçado por qualquer outro agente externo além da força da mola, o corpo em questão só pode oscilar com a frequência dada pela fórmula acima. Essa frequência característica do sistema corpo-mola é chamada frequência própria ou frequência natural de oscilação.

10- Ressonância

Consideremos os pêndulos A, B, C e D, constituídos por partículas de mesma massa, os três primeiros de comprimentos diferentes e o quarto, com comprimento igual ao primeiro, todos suspensos num fio elástico esticado.

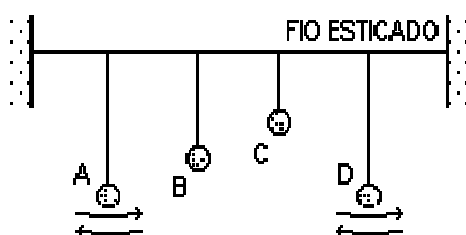


Fig. B.5 – Experiência de demonstração da ressonância.

Fazendo oscilar o pêndulo A com certa amplitude A, observa-se que os outros, que estavam parados, começam a oscilar também. Os pêndulos B e C, ficam pouco tempo a oscilar. O pêndulo D, ao contrário, com o passar do tempo oscila com uma amplitude cada vez maior enquanto que o pêndulo A oscila com uma amplitude cada vez menor. Quando a amplitude do pêndulo D chega a um valor máximo próximo de A, o pêndulo A fica imóvel. Então, os movimentos se repetem, com os pêndulos A e D a alternar os seus papéis. E assim, sucessivamente, até que a energia inicial associada ao movimento se dissipe. O fio esticado atua como intermediário na troca de energia entre os pêndulos.

Na experiência descrita acima, o pêndulo A, a oscilar com a sua frequência própria, força o fio esticado a oscilar com a mesma frequência. Dizemos que o fio esticado entra em vibração forçada. Então, o fio esticado força os pêndulos B, C e D a oscilar na mesma frequência do pêndulo A já que esta é, agora, também a frequência do fio. Como o fio não pode oscilar com uma frequência diferente de qualquer uma de suas frequências próprias, ele termina por parar. O mesmo acontece com os pêndulos B e C. Os pêndulos A e D são idênticos e, por isso, têm frequências próprias iguais. O pêndulo D, portanto, é forçado a oscilar com uma frequência igual

à sua frequência própria e pode absorver toda a energia disponível, aumentando a sua amplitude de oscilação.

Com o passar do tempo, os movimentos repetem-se com os papéis dos pêndulos A e D a alternar sucessivamente.

Quando a frequência com que um agente externo perturba um corpo é igual a frequência própria (ou uma das frequências próprias) de vibração ou de oscilação do corpo, este passa a oscilar com amplitude cada vez maior. Este fenómeno é o que se chama de ressonância. Se o agente externo perturba continuamente o corpo com o qual está em ressonância, a amplitude das vibrações ou oscilações pode ficar extraordinariamente grande a ponto de destruir o corpo, desde que as forças de resistência ou de dissipação sejam pequenas. Além disso, o fluxo de energia do agente externo para o corpo é máximo quando eles estão em ressonância. No exemplo acima, os pêndulos A e D estão em ressonância [Filho, Alves (2005)].

Movimento amortecido

1- Considerações gerais

Quando aplicamos uma força externa a um sistema mecânico, perturbando o seu equilíbrio estático estável e, em seguida, removermos essa força, o sistema vibrará em torno da sua posição original de equilíbrio – vibrações livres.

Na prática, sob condições reais, as vibrações livres de um sistema mecânico não se mantêm indefinidamente, elas desaparecem após algum tempo. Após alguns ciclos, o movimento oscilatório tende a extinguir-se decorrente da perda de energia mecânica devido á presença de resistências internas e externas; ou seja, os sistemas mecânicos estão sujeitos ao fenómeno do amortecimento – as vibrações serão livres e amortecidas.

Diversos tipos de amortecimento podem estar presentes num sistema mecânico. Um caso muito importante é o chamado amortecimento viscoso. Todos os fluidos possuem viscosidade, em maior ou menor “intensidade”. Por exemplo, quando a superfície do casco de um navio se movimenta na água, origina-se uma resistência ao

movimento do casco, também chamada de Resistência Viscosa ou Resistência de Atrito. Da Mecânica de Fluidos sabemos que as forças de amortecimento viscoso são proporcionais à velocidade V com que o corpo se desloca no fluido e o seu sentido é contrário a ela ($F = -c.V$). O Amortecimento Viscoso, como veremos adiante, representado pelo amortecedor c , permite obter soluções matemáticas “tratáveis”.

A massa m do sistema corpo-mola contabiliza a inércia presente. A mola K do sistema contabiliza a rigidez do sistema.

Se uma força excitadora externa actuar ao longo do tempo na massa m , a representação do fenómeno físico pode ser efectuada com o Modelo de um grau de liberdade completo: Massa, Mola, Amortecedor e Força Externa. Teremos assim, vibrações forçadas da massa m com a presença de amortecimento.

O conceito de Vibrações Naturais está relacionado com o facto dos “modos possíveis de vibrar” de um determinado sistema, e as correspondentes frequências de vibração de cada modo dependem somente da natureza do sistema, isto é, dos parâmetros inerentes ao sistema, tais como: a distribuição de massa, a rigidez da estrutura, etc. Um Sistema Discreto com n Graus de liberdade apresenta n modos possíveis naturais de vibração e a cada um desses modos associamos uma frequência de vibração. Vimos anteriormente que as vibrações reais são amortecidas, porque uma quantidade apreciável de energia é dissipada durante a vibração, e a “intensidade” do amortecimento depende do modo de vibração. Assim cada modo natural de vibração tem amortecimento diferente de outro modo de vibração.

Pode-se dizer de uma forma simplificada que o modelo de qualquer sistema, com vista ao estudo de Análise Dinâmica, é um “imenso mar de molas, massas e amortecedores” que contabilizam ponto a ponto nodal a rigidez da estrutura, a massa associada e o amortecimento presente. Sob a acção das forças que solicitam o sistema, deve-se responder qual o comportamento esperado, e para isso deve-se entender o que ocorre em cada grau de liberdade – deve-se conhecer a equação do Sistema massa, mola, amortecedor e força externa antes de iniciar qualquer estudo de Análise Dinâmica [Filho, Alves (2005)].

2- Sistema mecânico elástico, livre e amortecido

Diz-se que um sistema é vibratório quando os seus componentes possuem inércia e elasticidade. A massa caracteriza a inércia do sistema. A mola caracteriza a elasticidade que pode ser longitudinal ou torcional, ou, em certos sistemas, a acção da gravidade. Os sistemas reais são geralmente dissipativos, pois em maior ou em menor quantidade, haverá uma dissipação de energia sob a forma de calor devido fundamentalmente ao atrito interno dos corpos elásticos – surge então como elemento complementar do sistema vibrante, o amortecedor. A característica de uma mola (K) é a força necessária para lhe provocar uma deformação unitária e tem as dimensões (F/L). A posição da massa é definida pela cota do seu centro de gravidade em relação ao sistema fixo ou então em relação à sua posição estática.

Ao coeficiente de proporcionalidade (c) chama-se característica ou coeficiente de amortecimento. Regra geral, o coeficiente c é variável com x , mas, nos amortecedores chamados lineares, e nos atritos viscosos em geral, podemos admitir que $c = \text{constante}$. A característica de amortecimento c é afinal a força necessária para originar uma velocidade de aproximação ou de afastamento dos olhais do amortecedor igual à unidade, e tem as dimensões (F.T/L).

Representação esquemática do sistema elástico, livre e amortecido

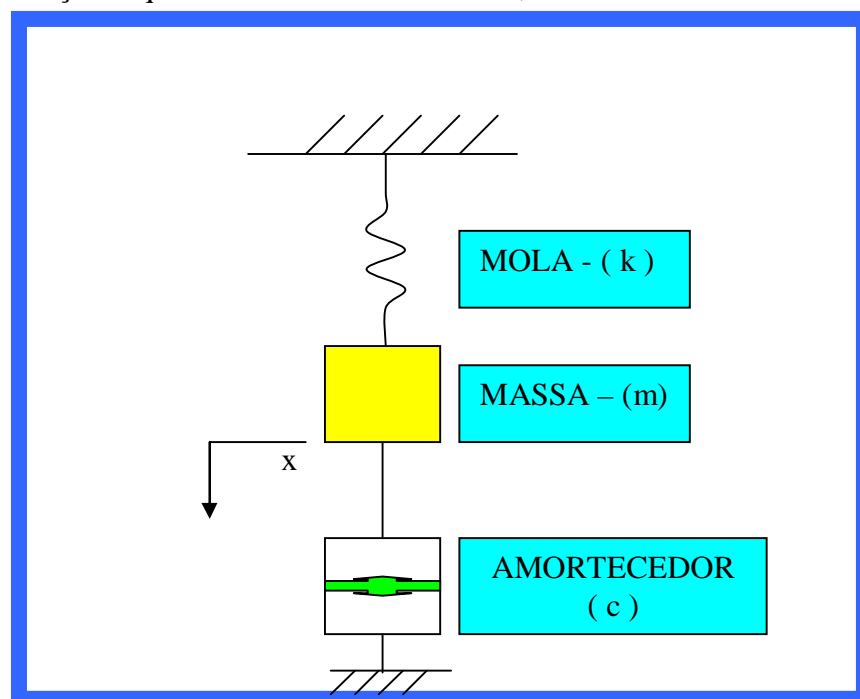


Fig. B.6 – Sistema elástico livre e amortecido.

2.1- Modelo matemático do sistema elástico, livre e amortecido com um grau de liberdade

O somatório das forças presentes é igual a:

$F_i + F_a + F_e = 0$; em que:

- F_i é a força de inércia e é igual a:

$$(-m.d^2x/dt^2)$$

- F_a é a força de amortecimento e é igual a:

$$(-c.dx/dt)$$

- F_e é a força elástica ou potencial e é igual a:

$$(-K.x)$$

Portanto a equação será igual a:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + Kx = 0$$

que é uma equação diferencial ordinária, linear, homogénea de 2ª ordem de coeficientes constantes.

Da última equação:

$$m.(d^2x/dt^2).dt + K.x.dt = -c.(dx/dt).dt$$

ou :

$$m.(dx/dt)^3.dt + K.x.(dx/dt).dt = -c(dx/dt)^2.dt$$

Ou ainda integrando entre dois instantes 1 e 2, temos:

$$\begin{aligned} 1/2.m(v^2 - v_1^2) + 1/2.K(x^2 - x_1^2) &= (1/2.mv^2 + 1/2.Kx^2) - (1/2.mv_1^2 + 1/2.Kx_1^2) = \\ &= E_2 - E_1 = -c \int_1^2 (dx/dt)^2 .dt \end{aligned}$$

Ou seja, entre os instantes 1 e 2 dissipou-se a energia correspondente ao 2º membro, portanto o sinal do integral é sempre positivo, ou seja, a energia final é menor do que a energia inicial (sistema dissipativo).

A equação:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + Kx = 0$$

sendo linear, homogénea, de coeficientes constantes, pode ser integrada usando o método geral para este tipo de equações, ou seja, o método das raízes características.

Assim da equação:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + Kx = 0$$

e substituindo x por:

$$x = e^{st}$$

e dividindo por

$$e^{st}$$

podemos escrever a seguinte equação característica

$$ms^2 + cs + K = 0$$

daqui se extraem os valores de s, que são as raízes da equação:

$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{K}{m}\right)}$$

Ao valor do coeficiente de amortecimento c que anula o radical da fórmula anterior dá-se o nome de coeficiente de amortecimento crítico (C_c):

$$c_c = 2.m.Wn$$

e a frequência própria angular (natural) do sistema, na ausência de amortecimento, é igual a :

$$W_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Define-se ainda o factor de amortecimento como o quociente:

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2mW_n}$$

Exposto isto, as raízes da equação podem ser determinadas da seguinte maneira:

$$s_{1,2} = W_n \cdot (-\xi \pm i \cdot \sqrt{1 - \xi^2})$$

As duas raízes s_1 e s_2 , respectivamente com os sinais + e –, substituídas na solução geral, originam a seguinte equação do movimento:

$$x = A \cdot e^{s_1 \cdot t} + B \cdot e^{s_2 \cdot t}$$

Em que A e B são números complexos conjugados.

Podemos distinguir três casos diferentes de amortecimento, dependendo do valor do coeficiente c :

- **Superamortecimento:**

$$c > c_c$$

que corresponde a um movimento não vibratório.

A seguir dá-se um exemplo deste tipo de movimento:

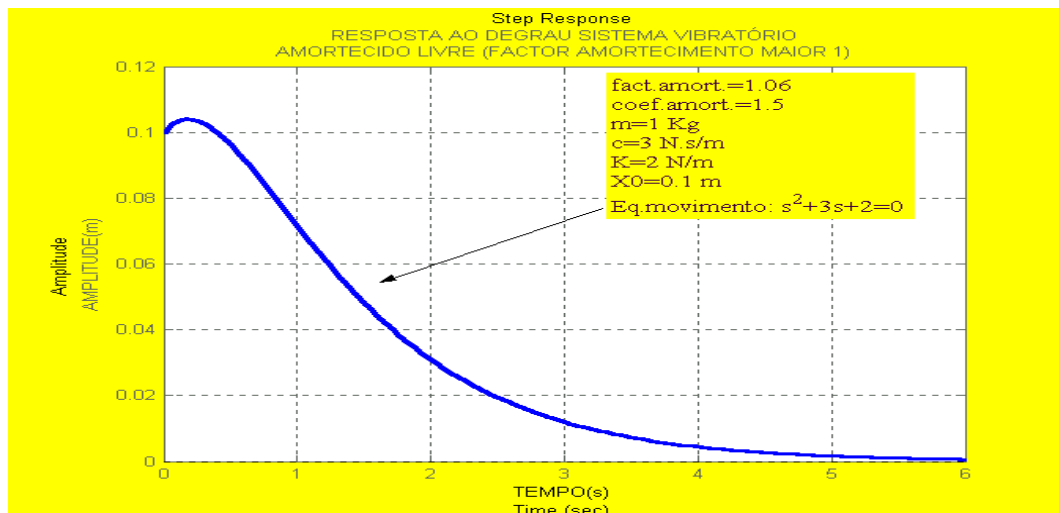


Fig. B.7 – Movimento superamortecido.

- **Amortecimento critico:**

$$c = c_c$$

que também corresponde a um movimento não vibratório. Os sistemas criticamente amortecidos são de particular interesse, uma vez que readquirem, sem oscilar, o seu equilíbrio no mais curto espaço de tempo.

- **Subamortecimento:**

$$c < c_c$$

Neste caso a solução geral é da forma

$$x = e^{-(c/2m)t} (C_1 \sin W_a t + C_2 \cos W_a t)$$

em que W_a (frequência circular do movimento amortecido) é dada por:

$$W_a^2 = \frac{K}{m} - \left(\frac{c}{2m} \right)^2$$

e substituindo

$$\frac{K}{m} = W_n^2$$

obtem-se:

$$W_a = W_n \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2} = W_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

A equação geral do movimento livre amortecido pode ainda tomar a seguinte forma:

$$x = X_0 e^{-(c/2m)t} \text{sen}(W_a t + \theta) = X_0 e^{-W_n \xi t} \text{sen}(W_a t + \theta)$$

O movimento é vibratório com amplitude decrescente.

Consoante o valor do factor de amortecimento ξ é maior ou menor, assim a rapidez de decréscimo da amplitude de oscilação é maior ou menor, e pode atingir um valor crítico tal que o sistema nem sequer chegue a vibrar. Assim o movimento livre de um sistema amortecido é uma sinusóide de amplitude sucessivamente decrescente (factor de amortecimento menor que 1).

Um exemplo deste tipo de movimento pode ser:

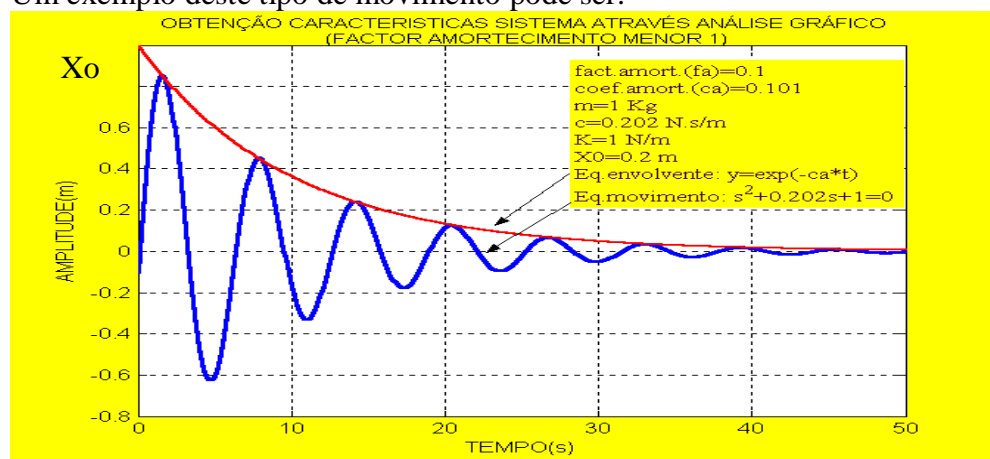


Fig. B.8 – Movimento subamortecido.

A equação da envolvente é dada por:

$$X_0 e^{-(c/2m)t}$$

e o período do movimento amortecido por

$$T_a = \frac{2\pi}{W_a}$$

Verifica-se que:

$$W_a < W_n$$

e

$$T_a > T_n$$

[Filho, Alves (2005)]

2.2- Método do decremento logarítmico (determinação do ξ)

Considerando um movimento sinusoidal amortecido como modelação para um teste de excitação de balanço, verifica-se uma relação entre os extremos relativos, evidenciada pela função envolvente exponencial negativa. Esta relação irá permitir a determinação experimental do factor de amortecimento ξ .

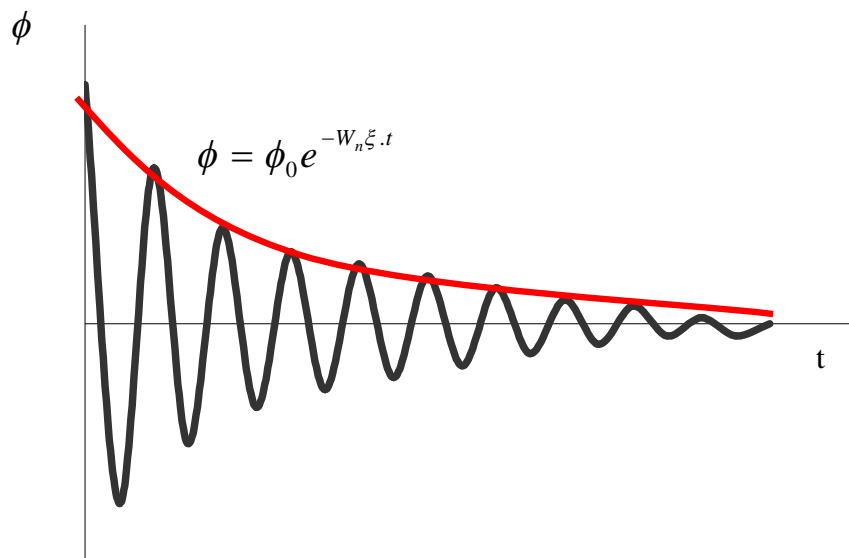


Fig. B.9 - Curva sinusoidal amortecida típica de um teste de extinção de balanço de um navio.

A quantidade de amortecimento existente num sistema pode ser medido pela taxa de decremento da oscilação. Para isso define-se o decremento logarítmico δ como o logaritmo natural da razão de dois máximos sucessivos de ϕ , representados respectivamente por ϕ_i e ϕ_{i+1} :

$$\delta = \ln \frac{\phi_i}{\phi_{i+1}}$$

Pela observação da figura anterior, a curva exponencial negativa, de equação $\phi_0 e^{(-\xi \omega_n t)}$; ϕ_0 representa a amplitude da inclinação inicial dada num teste de extinção de balanço.

Neste caso, o decremento logarítmico é definido por [Filho, Alves (2005)]:

$$\delta = \ln \frac{e^{(-W_n \xi . t_i)}}{e^{[-W_n \xi . (t_i + T_a)]}} = \ln e^{(W_n \xi . T_a)} = \xi \omega_n T_a$$

dado que os dois máximos sucessivos estão separados no tempo pelo período T_a . Como na oscilação amortecida o período é dado por:

$$T_a = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$$

Temos que:

$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \approx 2\pi\xi$$

Um procedimento comum para calcular o factor de amortecimento ξ é determinar o número de ciclos necessários para que a amplitude se reduza para metade do seu valor. Denominando por ϕ_0 a inclinação inicial e ϕ_n a amplitude após n oscilações, pode-se deduzir a seguinte expressão:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{\phi_0}{\phi_n} = 2\pi\xi$$

Esta expressão permite estimar o valor do factor de amortecimento ξ a partir do decremento logarítmico.

NOTA: Após a análise do gráfico do movimento livre linear amortecido (identificação do período do movimento, amplitude da 1ª e 2ª oscilação), e seguidamente com o cálculo do factor de amortecimento através da fórmula do decremento logarítmico, desenvolve-se todo o cálculo necessário para se obter as características do movimento e a respectiva equação do movimento.

3- Sistema mecânico elástico, forçado e amortecido (vibrações amortecidas forçadas)

Se considerarmos agora que o sistema da secção anterior está sujeito à acção de uma força periódica F de intensidade $F=F_m \sin W_f t$, de acordo com o seguinte esquema:

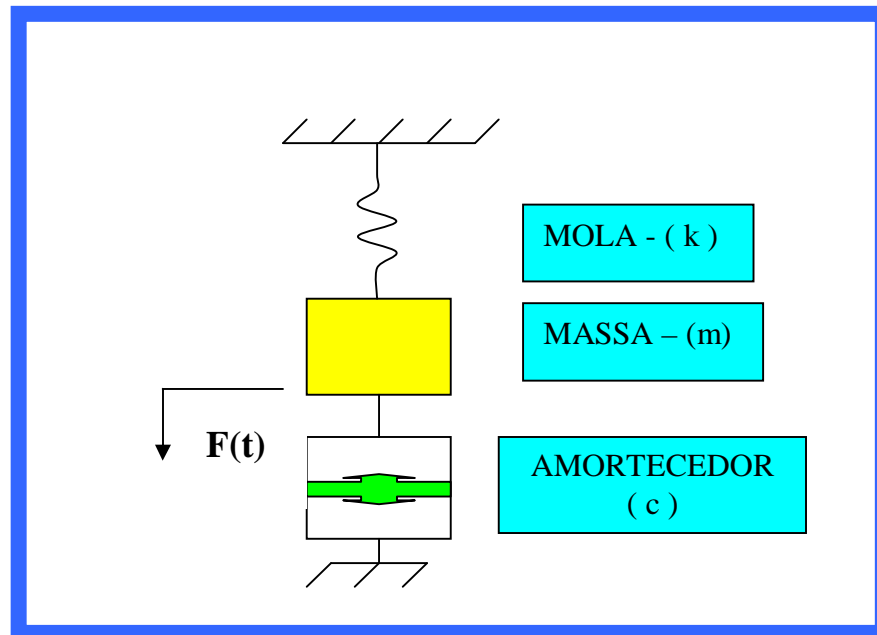


Fig. B.10 – Sistema mecânico elástico, forçado e amortecido.

A equação do movimento passa a ser:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = F_m \text{sen} W_f t$$

A solução geral da equação anterior obtém-se pela adição de uma solução particular à função complementar ou solução geral da equação homogênea do movimento amortecido livre (movimento transitório).

$$x(t) = x_{GH}(t) + x_p(t) = X_0 \cdot e^{-\xi \cdot W_n \cdot t} \cdot \text{sen}(W_a \cdot t + \theta) + X_m \cdot \text{sen}(W_f \cdot t - \varphi)$$

Um exemplo de aplicação da teoria do movimento amortecido forçado pode ser o seguinte:

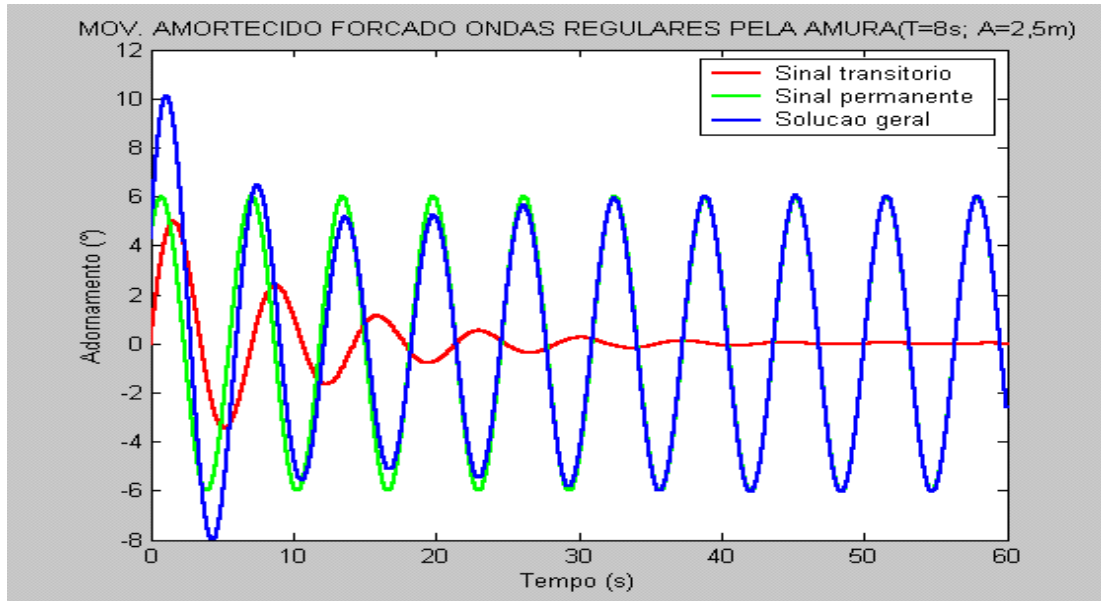


Fig. B.11 – Movimento amortecido forçado.

Nesta secção o interesse centra-se no estudo da vibração em regime estacionário, representada pela solução particular que é da forma:

$$x_p = X_m \sin(W_f t - \varphi)$$

Em que X_m é dado por:

$$X_m = \frac{F_m}{\sqrt{(K - mW_f^2)^2 + (cW_f)^2}}$$

e

$$\tan \varphi = \frac{cW_f}{K - mW_f^2} = \frac{2\xi\left(\frac{W_f}{W_n}\right)}{1 - \left(\frac{W_f}{W_n}\right)^2}$$

e definindo a razão de frequências r como:

$$r = \frac{W_f}{W_n};$$

Temos que:
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\xi \cdot r}{1 - r^2}$$

O factor de amplificação da oscilação, em função da razão de frequências

W_f / W_n , é dado por:

$$\frac{X_m}{F_m / K} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (W_f / W_n)^2]^2 + [2(c / c_c)(W_f / W_n)]^2}}$$

A figura seguinte representa o factor de amplificação em função da razão de frequências para vários valores do factor de amortecimento. Observe-se que a amplitude de uma vibração forçada pode manter-se pequena, quer através da escolha de um elevado coeficiente de amortecimento viscoso, c, quer mantendo afastadas, uma da outra, as frequências natural e forçada [Filho, Alves (2005)].

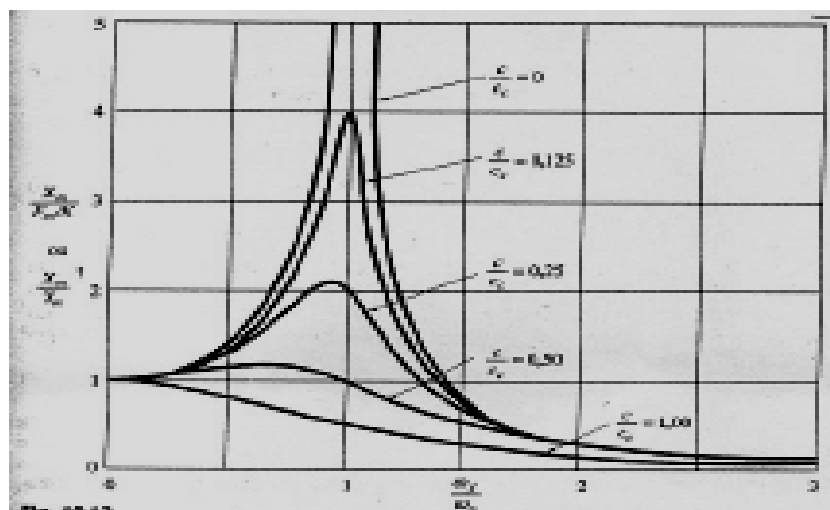


Fig. B.12 – Factor de amplificação em função da razão de frequências r.

MATLAB

O MATLAB é a abreviação para *MATrix LABoratory*) e é um sistema baseado em matrizes, empregado em cálculos matemáticos e de engenharia. Pode-se imaginar o MATLAB como uma espécie de linguagem desenvolvida com o intuito de manipular matrizes. Todas as variáveis tratadas pelo MATLAB são matrizes. Isto significa que o MATLAB só tem um tipo de dados; a matriz, que nada mais é do que um arranjo rectangular de números. O MATLAB possui um conjunto imenso de rotinas para obtenção de saídas gráficas.

O MATLAB tem a facilidade do auxílio interactivo (*help-on-line*), que pode ser utilizado sempre que necessário. O comando *help* quando executado, mostra uma lista de funções e de operadores predefinidos, para os quais o recurso de auxílio (*help*) está disponível.

O comando: *help* “nome da função”, dará informações sobre a função especificada. O comando: *help help*. mostra como utilizar o auxílio interactivo (*help on line*).

È bom lembrar que este relatório não discute muitas das importantes características do MATLAB que, nem por isso, deixam de ser importantes e úteis. Para o estudo dessas características, o leitor deve consultar obras de referência como o manual do MATLAB.

A versão utilizada do Matlab foi a R6.5 13.

A seguir indica-se um exemplo de aplicação do MATLAB, na análise de parâmetros do movimento oscilatório amortecido livre, após testes de extinção de balanço a bordo do NRP “João Roby”:

```
%Informação recolhida: T=período, x1= 1ª amplitude máxima positiva, x2=2ª  
% amplitude máxima positiva, x3=3ª amplitude máxima positiva,  
% x4=1ª amplitude máxima negativa, t1= tempo correspondente a passagem  
% pelo 1º zero da função  
T=7.14;  
x1=7;  
x2=3.8;  
x3=1.8;  
x4=-5;  
t1=4;
```

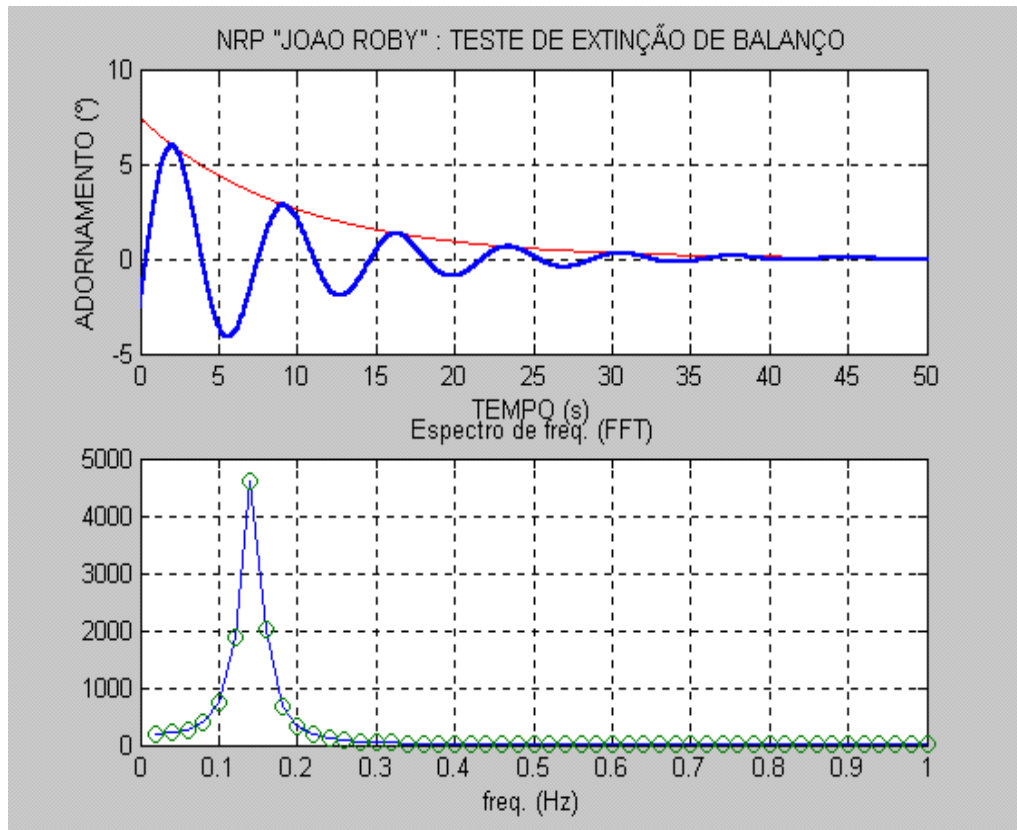


```
%Determinação do decremento logarítmico (dl), coeficiente de amortecimento
%(ca), factor de amortecimento (fa) e da velocidade inicial (v0=dx/dt);
dl=log(x2/x3);
ca=dl/T;
W=(2*pi)/T;
W0=sqrt((W*W)-(ca*ca));
fa=ca/W0;
v0=((x4-x1)/(t1-0));

%Calculo do angulo de fase (e conversao para radianos);
phi=atan((v0+(ca*x1))/(W*x1));

%Parametrização escala de tempo (tempo inicial=0), e determinação da
%equação do movimento;
t=-0.0:0.01:50.0;
BETA=(sqrt((x1*x1)+(((v0+(ca*x1))/W)*((v0+(ca*x1))/W)))*(exp(-ca*t)));
x=BETA.*sin((W*t)+phi);
%Equação da curva da envolvente do movimento;
y=BETA;

%Desenho do gráfico do movimento e da envolvente;
tt=linspace(0,50,100);
y1=interp1(t,x,tt,'spline');
subplot(211)
plot(t,y,'r-',t,x,'b-');
title('NRP "JOAO ROBY" : TESTE DE EXTINÇÃO DE BALANÇO');
xlabel('TEMPO (s)');
ylabel('ADORNAMENTO (°)');
grid;
Y = fft(y1);
N = length(Y);
Y(1) = [];
power = abs(Y(1:N/2)).^2;
nyquist = 1;
freq = (1:N/2)/(N/2)*nyquist;
subplot(212)
plot(freq,power,freq,power,'o'), grid
xlabel('freq. (Hz)')
title('Espectro de freq. (FFT)')
```



(Frequência fundamental=0,14Hz; $T_a=7,14s$)

Fig. B.13 – Exemplo de teste de extinção de balanço a bordo do NRP “João Roby”.

$W_a=0,873$ rad/s (frequência angular amortecida de adorno)

$W_n=0,88$ rad/s (frequência angular natural de adorno)

$C_a=0,1046$ (coeficiente de amortecimento)

$dl=0.747$ (decremento logaritmico)

$fa=0.1197$ (factor de amortecimento)

$\phi=-0.353$ rad (ângulo de fase)

$V_o=-3$ m/s (velocidade inicial de adorno)

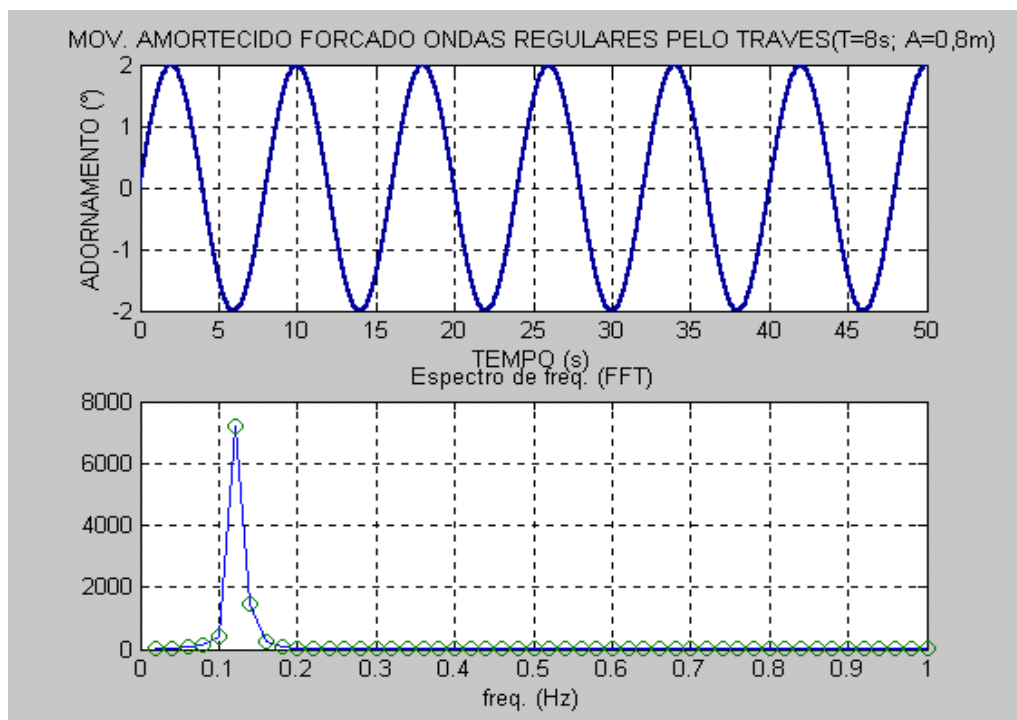
A seguir dá-se outro exemplo para o movimento amortecido forçado, com aplicação das transformadas rápidas de Fourier (FFT):

%INTERVALO TEMPORAL

$t=0:0.01:50;$

$y=2*\sin(0.785*t);$

```
%Desenho do gráfico do movimento e da FFT;
tt=linspace(0,50,100);
y1=interp1(t,y,tt,'spline');
subplot(211);
plot(t,y,'r-');
title('MOV. AMORTECIDO FORCADO ONDAS REGULARES PELO
TRAVES(T=8s; A=0,8m)');
XLABEL('TEMPO (s)');
YLABEL('ADORNAMENTO (°)');
grid;
Y = fft(y1);
N = length(Y);
Y(1) = [];
power = abs(Y(1:N/2)).^2;
nyquist = 1;
freq = (1:N/2)/(N/2)*nyquist;
subplot(212);
plot(freq,power,freq,power,'o'), grid;
xlabel('freq. (Hz)');
title('Espectro de freq. (FFT)');
```



(Frequência fundamental = 0,125Hz ; $T_a=8s$)

Fig. B.14 – Exemplo de teste com ondas regulares a bordo do NRP “João Roby”.

ANEXO C

Critérios de estabilidade das unidades navais de Marinha.

ANEXO C: Critérios de estabilidade das unidades navais de Marinha.

O presente documento é parte integrante de uma instrução técnica da Marinha intitulada “Critérios de Estabilidade das UN`s (Unidades Navais) e UAM`s (Unidades Auxiliares de Marinha) da Marinha Portuguesa – ITDINAV802 (A)”, com o grau de segurança NÃO CLASSIFICADO.

1. INTRODUÇÃO

Os critérios foram definidos para navios monocascos, e poderão não ser apropriados para navios multicasco, de sustentação aerostática ou de sustentação hidrodinâmica.

Os critérios de estabilidade intacta e em avaria, têm de ser cumpridos incluindo uma margem para o aumento de peso que é passível de ocorrer antes da próxima verificação da estabilidade do navio, bem como uma margem para a variação vertical do centro de gravidade (CG). Na ausência de elementos concretos acerca da grandeza deste aumento de peso, deverão ser utilizadas os seguintes valores:

- **Navios de guerra** (por cada 10 anos)
 - ⇒ 5% de aumento do deslocamento carregado;
 - ⇒ 3% de aumento na altura do VCG na condição de deslocamento leve.
- **Navios auxiliares e de transporte de passageiros** (por cada 12 anos)
 - ⇒ 3% de aumento do deslocamento leve;
 - ⇒ 3% de aumento na altura do VCG na condição de deslocamento leve.
- **Outros navios auxiliares que operem em águas costeiras ou portuárias** (por cada 20 anos)
 - ⇒ 5% de aumento do deslocamento leve;
 - ⇒ 3% de aumento na altura do VCG na condição de deslocamento leve.

2. CAMPO DE APLICAÇÃO

2.1. Definição das classes e categorias de navios

Considera-se, para definição dos critérios a aplicar, que os navios de superfície se encontram divididos em duas classes, e dentro destas em diversas categorias, a saber:

1 - Unidades Navais (UN's)

A - Oceânico

A.1. - Navios que se espera sofrerem todos os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais). Esta categoria inclui os navios que se deslocam integrados em forças anfíbias e de assalto.

A.2. Navios que se espera evitarem os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais).

B - Costeiro

B.1. Navios que se espera sofrerem todos os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais).

B.2. Navios que se espera evitarem os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais), mas permanecerem no mar em todas os outros estados climatéricos.

B.3. Navios que abrigarão em portos ou fundeadouros protegidos caso se prevejam ventos superiores a Força 8, e embarcações portuárias.

2 - Unidades Auxiliares de Marinha (UAM's)

A - Todas, com excepção dos casos que constam em B.

B - Casos Especiais

B.1. Rebocadores

B.2. Docas Flutuantes

B.3. Embarcações miúdas (incluindo salva-vidas)

B.4. Veleiros

B.5. Navios de apoio à balizagem

B.6. Batelões e pontões

3. DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Entre outras condições de carregamento, as que mais interessam para o presente trabalho são as seguintes.

3.1. Deslocamento mínimo operativo

A condição de *deslocamento mínimo operativo* é definida como adicionando à condição de deslocamento leve, os pesos referentes à guarnição completa e respectiva bagagem, 95% da capacidade dos tanques de lastro, e às percentagens da capacidade dos tanques de combustível, óleo lubrificante, água doce e consumíveis necessárias (e não inferiores a 10%) para assegurar os requisitos mínimos exigidos pelo critério de estabilidade. Os passageiros, a carga, os aéreos, e as munições poderão ser incluídos nos pesos a adicionar, ou não, adoptando-se a condição que resulte na situação mais penalizante em termos de estabilidade.

Tanque/Circuito	Carga
Combustível, reserva	CN
Combustível, compensados	100% (comb.)
Combustível, serviço	Nível serviço
Combustível, carga	CN
Água alimentação, principais	95%
Água alimentação, auxiliares	95%
Água alimentação, recuperação	CN
Combustível aviação, reserva	CN
Óleo lubrificação, reserva	95%
Óleo lubrificação, serviço	Nível serviço
Óleo lubrificação, purgas	Vazio
Água doce	CN
Diversos, purgas	Vazio
Lastro	95%
Circuitos, Água doce	100%
Circuitos, Água salgada	100%
Circuitos, Diversos	Nível serviço

CN - Conforme necessário pelas condições de carga de líquidos para satisfazer o critério de estabilidade.

Quadro nº C.1 – Definição das cargas líquidas na condição de deslocamento mínimo operativo.

Paióis/Diversos	Carga
Paióis de equipamento	50%
Paióis de Géneros	10%
Aéreos embarcados	PC
Pessoal grupo assalto	PC
Veículos grupo assalto	PC
Munições grupo assalto	PC
Munições	PC
Guarnição	100%

PC - Considera-se o pior caso possível

Quadro nº C.2 - Definição das cargas sólidas na condição de deslocamento mínimo operativo.

3.2. Deslocamento carregado (Deep condition)

A condição de *deslocamento carregado* é definida como adicionando à condição de deslocamento leve, os pesos referentes a 95% da capacidade dos tanques de água doce, 95% da capacidade dos tanques de combustível e óleo lubrificante, capacidade total de mantimentos, munições, e materiais de consumo nos respectivos paióis, carga, passageiros e ainda o peso correspondente à guarnição completa e respectiva bagagem. Nesta condição de carga os tanques, paióis, e outros itens deverão encontrar-se conforme é descrito em detalhe pelas seguintes tabelas:

Tanque/Circuito	Carga
Combustível, reserva	95%
Combustível, compensados	100% (comb.)
Combustível, serviço	Nível serviço
Combustível, carga	95%
Água alimentação, principais	95%
Água alimentação, auxiliares	95%
Água alimentação, reserva	95%
Água alimentação, recuperação	95%
Combustível aviação, reserva	95%

Óleo lubrificação, reserva	95%
Óleo lubrificação, serviço	Nível serviço
Óleo lubrificação, purgas	95%
Água doce	95%
Diversos, purgas	Vazio
Lastro	Vazio
Circuitos, Água doce	100%
Circuitos, Água salgada	100%
Circuitos, Diversos	Nível serviço

Quadro nº C.3 - Definição das cargas líquidas na condição de deslocamento carregado.

Paióis/Diversos	Carga
Paióis de equipamento	100%
Paióis de Géneros	100%
Aéreos embarcados	100%
Pessoal grupo assalto	100%
Veículos grupo assalto	100%
Munições grupo assalto	100%
Munições	100%
Guarnição	100%

PC - Considera-se o pior caso possível

Quadro nº C.4 - Definição das cargas sólidas na condição de deslocamento carregado.

4. CRITÉRIO DE ESTABILIDADE INTACTA PARA NAVIOS DE GUERRA

4.1. Requisitos da curva de braço endireitante intacta

A curva de braço endireitante (GZ) deverá obedecer a um mínimo de requisitos de forma a verificar que a sua forma se enquadre dentro de determinados limites preestabelecidos, e assim assegurar que o navio disporá da maioria da energia estabilizadora entre os 0 e os 40° de adornamento.

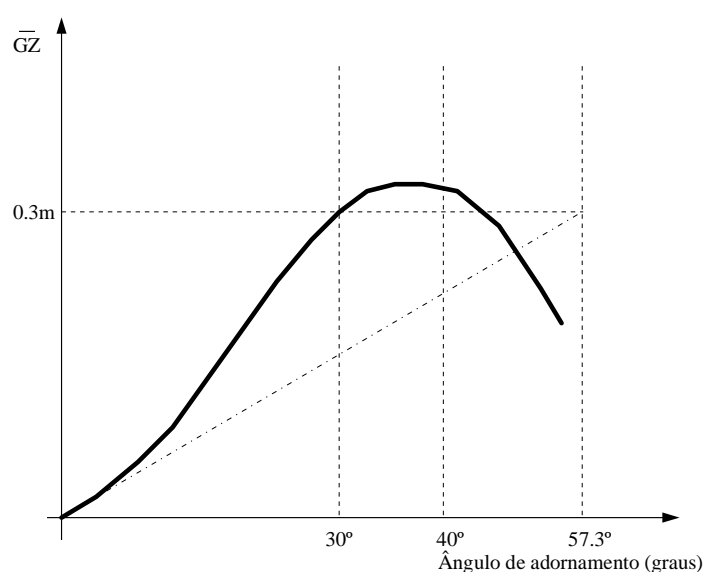


Fig. C.1 – Curva de braço endireitante intacta.

- A curva de braço endireitante deverá terminar no ângulo em que se dá o alagamento incontrollável devido à entrada de água através de aberturas permanentes na estrutura. São exemplos destas aberturas estruturais os casos das condutas de admissão e evacuação de motores principais, aspirações e descargas de ventiladores de casas de máquinas, etc.
- A curva de braço endireitante deverá obedecer ao critério especificado na tabela seguinte:

Área sob curva GZ dos 0 aos 30°	≥ 0.08 m.rad
Área sob curva GZ dos 0 aos 40°	≥ 0.133 m.rad
Área sob curva GZ dos 30° aos 40°	≥ 0.048 m.rad
GZ máximo	≥ 0.3 m
Ângulo de GZ máximo	≥ 30°
GM corrigida para efeito de espelho líquido	≥ 0.3 m
Ângulo de estabilidade nula	tão grande quanto possível (70° mínimo admissível em projecto)

Quadro nº C.5 - Critérios para a curva de braço endireitante.

4.2. Estabilidade sob vento

4.2.1. Definição das condições

Assume-se que vento pelo través e balanço bombordo-estibordo ocorrem simultâneamente. No caso de navios convencionais (monocasco) assume-se um ângulo máximo de balanço bombordo-estibordo igual a 25 graus.

As velocidades nominais do vento a serem utilizadas são dependentes da categoria do navio, dependente da sua aplicação, conforme definido pela tabela seguinte:

Categoria de Navio	Velocidade vento mínima para fins de projecto (nós)	Velocidade vento mínima para navios com pelo menos 5 anos em serviço (nós)
A - OCEÂNICO		
A.1. Navios que se espera sofrerem todos os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais). Esta categoria inclui os navios que se deslocam integrados em forças anfíbias e de assalto	100	90
A.2. Navios que se espera evitarem os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais).	80	70
B - COSTEIRO		
B.1. Navios que se espera sofrerem todos os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais).	100	90

B.2. Navios que se espera evitarem os efeitos directos de condições extremas (e.g. ciclones tropicais), mas permanecerem no mar em todas os outros estados climatéricos.	80	70
B.3. Navios que abrigarão em portos ou fundeadouros protegidos caso se prevejam ventos superiores a Força 8, e embarcações portuárias	60	50
C - PORTO		
C.1. Todos os navios	60	50

Quadro nº C.6 – Definição das condições: velocidades nominais do vento.

4.2.2. Determinação do braço inclinante

O braço inclinante devido ao efeito do vento pelo través deverá ser determinado da seguinte forma:

- Considerar o perfil longitudinal do navio, da linha de flutuação ao topo do mastro mais alto, dividindo-o em n faixas paralelas à linha de água com a altura de 1 metro (no caso de zonas de geometria substancialmente irregular, poder-se-á reduzir a altura destas faixas para 0.5 m, por forma a melhorar a precisão do cálculo);
- Determinar a área vélica de cada uma das faixas do perfil longitudinal do navio, e calcular a posição vertical do centróide da área vélica do navio.
- Determinar a pressão exercida pelo vento em cada uma das faixas (P_i), utilizando a seguinte expressão:

$$P_i = C\rho \frac{V_i^2}{2g}$$

onde

C - coeficiente adimensional para cada tipo de navio. Caso não seja conhecido, é razoável assumir-se a expressão baseada no valor médio de C , i.e. $P_i = 0.0195.V_i^2$

ρ - densidade do ar, 1.025 kg/m³;

g - aceleração da gravidade, 9.81 m/s²;

V_i - velocidade do vento, nós.

Assume-se que a velocidade nominal do vento ocorre 10 metros acima da superfície da água. A velocidade real do vento às diferentes elevações acima da linha de água deverá ser determinada através da Fig.F.2.

- Calcular o braço inclinante devido ao vento, através da expressão:

$$\text{Braço Inclnante} = \frac{L \cos^2 \theta}{1000 \cdot W} \sum_{i=1}^n P_i A_i$$

onde

P_i - pressão total exercida pelo vento em cada faixa longitudinal, kg/m²;

A_i - área vélica de cada faixa longitudinal, m²;

L - braço definido entre os pontos de meio calado ao centróide da área vélica do navio, conforme indicado na Fig.F.3, m;

V - velocidade nominal do vento, nós;

W - deslocamento do navio, t;

θ - ângulo de adornamento, graus.

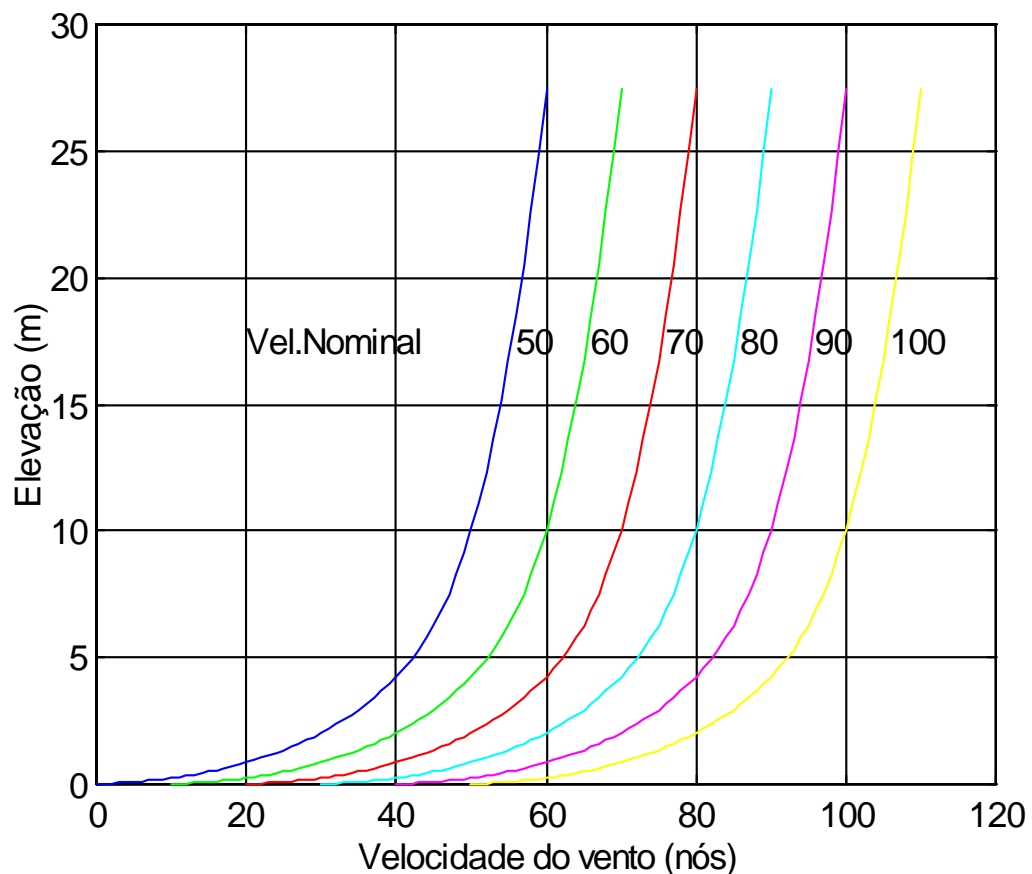


Fig. C.2 – Variação da velocidade do vento com a elevação.

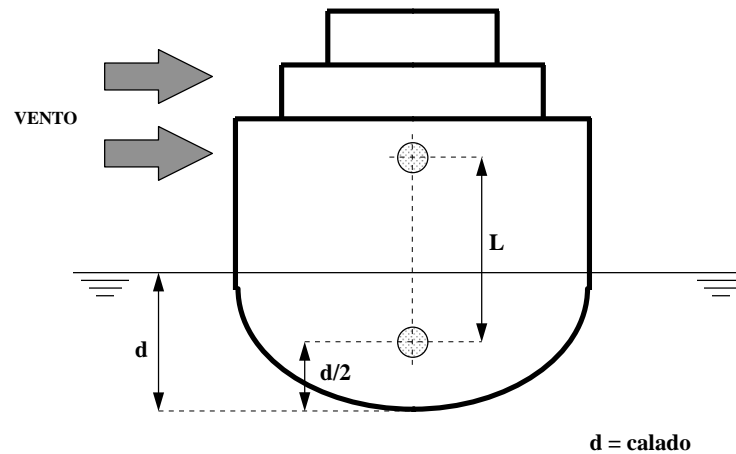


Fig. C.3 – Braço definido entre os pontos de meio calado ao centróide da área vélica do navio (L).

4.2.3. Critério

Com base na figura seguinte., o critério a ser cumprido é o seguinte:

- O ângulo de adorno devido à acção directa do vento pelo través (θ) não deverá exceder os 30 graus.
- A relação entre a energia perturbadora (A_2) e estabilizadora (A_1) deverá ser $A_1 > 1.4 A_2$
- O valor de GZ no ponto C não deverá exceder 60% do valor máximo de GZ.

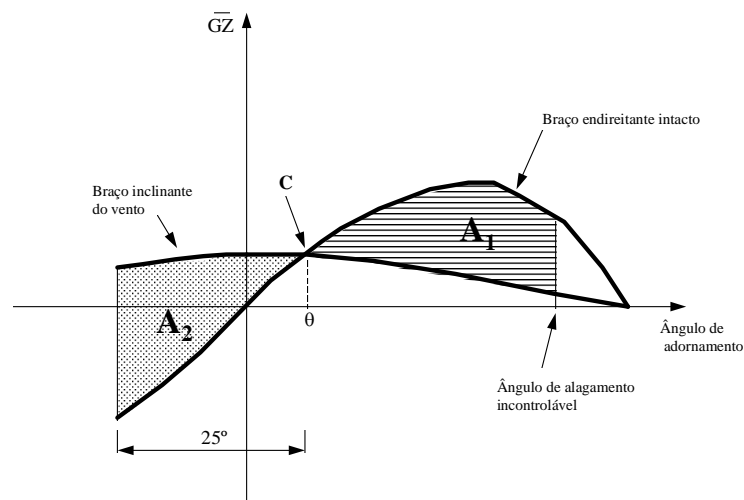


Fig. C.4 – Curvas de braço endireitante (GZ) e braço incliante devido ao vento pelo través.

4.3. Estabilidade em guinada a velocidades elevadas

4.3.1. Definição das condições

Considera-se que o navio adorna a um bordo exclusivamente devido à acção da força centrífuga, originada por uma guinada a elevada velocidade. O ângulo de adornamento considerado não reflecte o comportamento transiente do navio no início e final da guinada, mas sim quando estabilizado durante a guinada.

4.3.2. Determinação do momento inclinante

A força centrífuga que actua sobre um navio durante uma guinada é expressa por:

$$ForçaCentrifuga = \frac{1000.WV^2}{gR}$$

onde

W- deslocamento do navio, ton;

V - velocidade linear do navio durante a guinada, m/s;

g - aceleração da gravidade, 9.81 m/s²;

R - raio de giração do navio, m. Para efeitos de cálculo é razoável assumir que **R** seja aproximadamente metade do diâmetro táctico.

O braço inclinante usado em conjunção com a força centrífuga referida atrás é definido como a distância entre o centro de gravidade do navio e o centro de resistência lateral das obras vivas. Este braço é função do coseno do ângulo de adornamento. A posição vertical do centro de resistência lateral das obras vivas é assumida a meio calado.

$$BraçoInclinante = \frac{V^2 a}{gR} \cos \theta$$

Onde

- a - distância vertical entre o centro de gravidade do navio e o centro de resistência lateral, definido a meio calado, com o navio sem adorno, m;
- θ - ângulo de adorno, graus.

4.3.3. Critério

Com base na seguinte figura, o critério a ser cumprido é o seguinte:

- O ângulo de adorno estabilizado devido à acção da força centrífuga durante a guinada não deverá exceder os 15 graus.
- A reserva de energia estabilizadora (A) deverá ser maior que 40% da área total sob a curva de braço endireitante $A > 0.4 A_T$, medida até ao ângulo de alagamento incontrolável.
- O valor de GZ no ponto C não deverá exceder 60% do valor máximo de GZ.

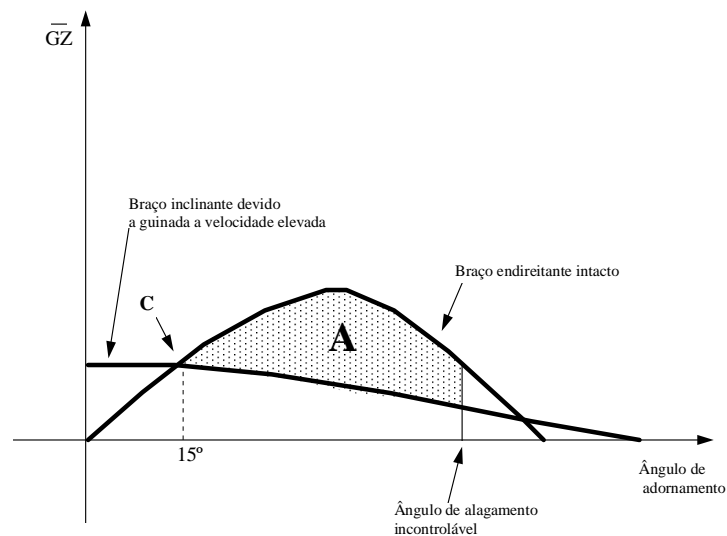


Fig. C.5 – Curvas de braço endireitante (GZ) e braço inclinante devido a guinada a velocidade elevada.

4.4. Estabilidade sob elevação e transbordo de cargas pesadas

4.4.1. Definição das condições

A elevação de cargas pesadas é um caso particularmente crítico em navios pequenos, que por qualquer razão tenham de elevar e carregar/descarregar pesos. Esta operação tem duas consequências simultâneas em termos da estabilidade transversal do navio:

- A elevação (e eventualmente a adição, no caso de carregar) de peso, que actua na extremidade da lança do equipamento/sistema de elevação, faz subir o centro de gravidade do navio, diminuindo assim o seu braço endireitante;
- O transbordo da carga, afastando-a da linha de mediania do navio, gera um momento inclinante que causará o adornamento do navio.

Nesta análise deverão ser consideradas todas as posições possíveis do equipamento/sistema de elevação.

4.4.2. Determinação do momento inclinante

Para efeitos de aplicação do critério, a curva de braço endireitante é modificada, corrigindo a posição vertical do centro de gravidade (VCG) e o deslocamento do navio, por forma a quantificar o efeito da adição de peso que se considera no local onde ficará estivado.

A curva do braço inclinante é calculada através da expressão:

$$BraçoInclinante = \frac{w(a \cos \theta + d \sin \theta)}{W}$$

onde

w - peso da carga, t;

a - distância transversal da linha de mediania à extremidade da lança do equipamento/sistema de elevação, m;

d - altura do ponto de suspensão acima do convés onde a carga ficará estivada, m;

W - deslocamento, incluindo a adição da carga deslocada (w), t;

θ - ângulo de adornamento, graus.

4.4.3. Critério

Com base na figura seguinte, o critério a ser cumprido é o seguinte:

- O ângulo de adornamento estabilizado devido à acção do momento inclinante originado pela elevação e transbordo de pesos não deverá exceder os 15 graus.
- A reserva de energia estabilizadora (A) deverá ser superior a 40% da área total sob a curva de braço endireitante $A > 0.4 A_T$, medida até ao ângulo de alagamento incontrolável.
- O valor de GZ no ponto C não deverá exceder 60% do valor máximo de GZ.
- Caso o navio suspenda pesos no mar por períodos de tempo relativamente longos, dever-se-ão adicionar os braços inclinantes devido aos efeitos combinados do balanço bombordo-estibordo e de vento moderado (pelo través oposto ao qual a carga é suspensa).

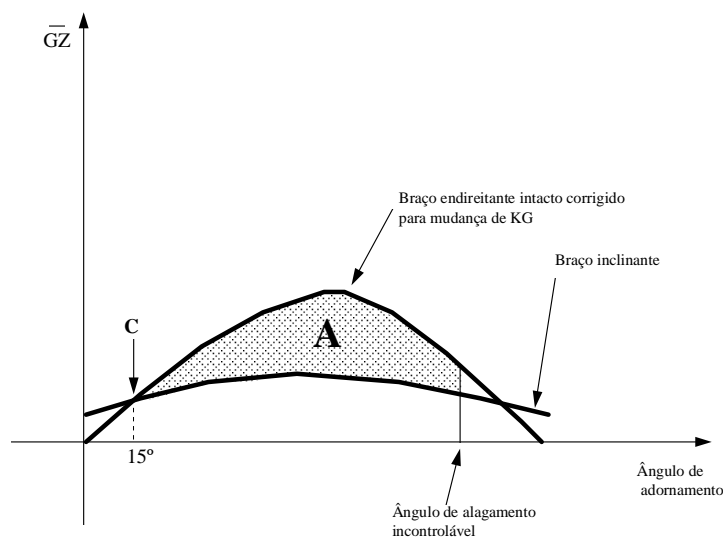


Fig. C.6 – Curvas de braço endireitante (GZ) e braço inclinante devido à elevação e transbordo de cargas pesadas.

5. CRITÉRIO DE ESTABILIDADE EM AVARIA PARA NAVIOS DE GUERRA

5.1. Definição das condições

Definem-se como situações de avaria a considerar no presente critério, as seguintes:

1. Danos estruturais que resultem em alagamento, devido a:
 - Embate com o fundo resultando em alagamento moderado;
 - Abalroamento de proa;
 - Abalroamento ou embate com o fundo resultando em alagamento de grandes proporções;
 - Explosão por acção inimiga resultando em alagamento de grandes proporções.
2. Alagamentos causados por:
 - Ventos de través combinados com balanço bombordo-estibordo;
 - Alagamento progressivo (rupturas de circuitos, etc.);
 - Combate a incêndios no interior do navio.

A principal ideia subjacente a este critério é assegurar a sobrevivência do navio, e não necessariamente a manutenção da sua capacidade combatente.

5.1.1. Critério de compartimentação estanque

A base para a determinação da extensão do alagamento é o comprimento de casco danificado (aberto para o mar) em qualquer ponto do comprimento do navio, que resulte de acção inimiga ou colisão. Nos navios pequenos, contudo, e devido a limitações práticas, o critério é baseado no número de compartimentos estanques alagados. Para efeitos de cálculo, o comprimento do navio deverá ser referido ao seu valor entre perpendiculares.

O critério de compartimentação estanque deverá assegurar que:

- Embarcações com menos de 30 metros de comprimento deverão ser capazes de suportar, no mínimo, o alagamento de um compartimento estanque principal;
- Navios com comprimento compreendido entre 30 e 92 metros deverão ser capazes de suportar, no mínimo, o alagamento de quaisquer dois compartimentos estanques principais adjacentes;
- Os navios com mais de 92 metros de comprimento deverão suportar o alagamento rápido devido a uma abertura no casco localizada em qualquer ponto ao longo do comprimento do navio, com extensão igual a 15% do comprimento do navio;

5.1.2. Extensão dos danos nas obras vivas

5.1.2.1. Extensão longitudinal

Nos casos onde a compartimentação estanque é baseada no número de compartimentos alagados, a extensão longitudinal do alagamento é definida pela posição das anteparas estanques transversais que limitam esses mesmos compartimentos.

Nos casos onde a compartimentação estanque é baseada no comprimento de casco aberto ao mar, a extensão longitudinal do alagamento é definida pela posição das anteparas transversais estanques imediatamente a vante e a ré dos limites da abertura no casco.

5.1.2.2. Extensão transversal

A extensão máxima do alagamento transversal é definida pela resultante de danos em penetração transversal até à linha de mediania, mas não afectando, contudo, qualquer antepara longitudinal estanque localizada na linha de mediania.

Dever-se-á assumir uma penetração transversal menor sempre que de tal resulte uma situação de alagamento mais penalizante em termos de estabilidade.

5.1.2.3. Extensão vertical

Assume-se que todos os pavimentos e plataformas não são estanques, já que tal resulta na situação mais adversa, devido ao alagamento em pavimentos superiores, ao efeito de espelhos líquidos, e à possibilidade de ocorrência de alagamento assimétrico.

Todos os pavimentos e plataformas localizados na zona danificada do casco assumem-se também como danificados, e conseqüentemente, não estanques.

No caso de danos no duplo fundo, poderão resultar dois casos, que deverão ser considerados:

- O alagamento de zonas baixas do navio poderá aumentar a estabilidade;
- O eventual alagamento assimétrico diminui a estabilidade;

Relativamente à extensão vertical dos danos ao duplo fundo deverá ser assumido o caso mais desfavorável.

5.1.3. Condições de carregamento consideradas

As condições de carregamento a considerar na avaliação da estabilidade em avaria são as seguintes:

- Deslocamento carregado;
- Deslocamento mínimo operativo.

Estas condições são definidas de acordo com o estipulado na Secção 3.

5.2. Curvas de braço endireitante e inclinante (do vento) em avaria

O braço endireitante do navio deverá ser recalculado para cada caso de avaria, levando em conta as perdas de flutuabilidade inerentes aos compartimentos alagados, contabilizando ainda o efeito de espelhos líquidos e comunicação aberta para o mar, onde aplicável. A curva de braço endireitante deverá ser ainda corrigida, com uma redução de $0.05 \cos \theta$ de forma a contabilizar alagamentos assimétricos

desconhecidos ou movimentação transversal de carga não peada durante o adornamento.

O braço inclinante do vento deverá ser determinado de acordo com o procedimento descrito na Secção 4, parágrafo 4.2.2., utilizando uma velocidade nominal do vento definida da seguinte forma:

- Pela curva da Fig.F.7, para deslocamentos até 5000 toneladas;
- Pela expressão $V = 22.5 + 0.15\sqrt{W}$, para deslocamentos superiores a 5000 toneladas.

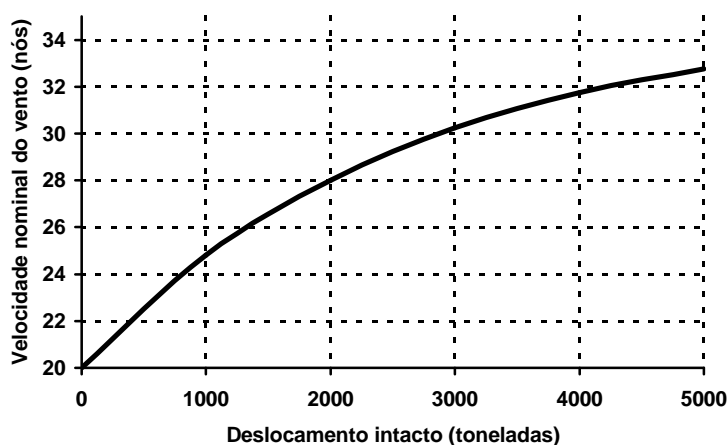


Fig. C.7 - Velocidade nominal do vento para estabilidade em avaria de navios com deslocamento até 5000 toneladas.

5.3. Critério

Com base na figura F.9, o critério a ser cumprido é o seguinte:

- O ângulo de adornamento estático, ou de banda, definido pelo ponto B, devido aos danos sofridos não deverá exceder os 15 graus;
- A relação entre a energia perturbadora (A_2) e estabilizadora (A_1) deverá ser $A_1 > 1.4 A_2$;
- A energia estabilizadora (A_1) deverá ser maior que o valor definido na figura seguinte.

- O valor de GZ no ponto C não deverá exceder 60% do valor máximo de GZ, sendo este último definido pelo braço endireitante até aos 45° ou ao ângulo de alagamento incontrolável, aplicando-se o menor dos dois;
- O caímento deverá ser menor que o necessário para causar alagamento incontrolável através de aberturas permanentes;
- A altura metacêntrica longitudinal deverá ser positiva, i.e. $GM_L > 0$.

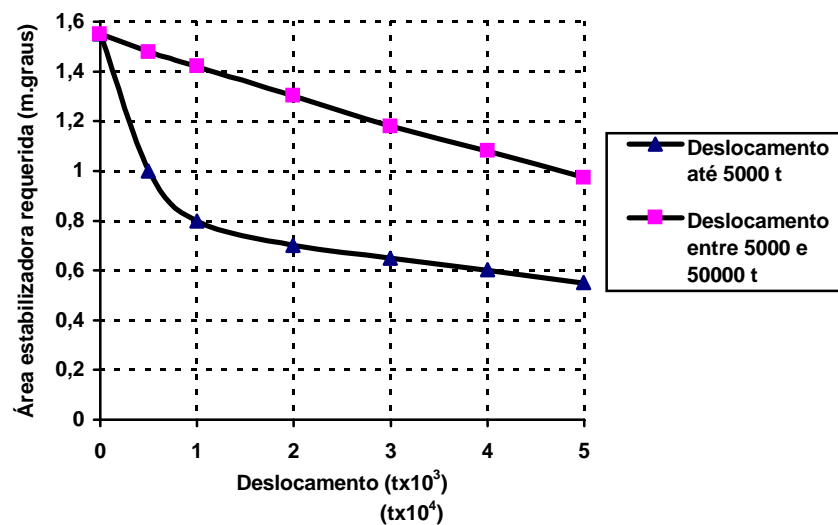


Fig. C.8 - Área estabilizadora (A_1) requerida para estabilidade em avaria.

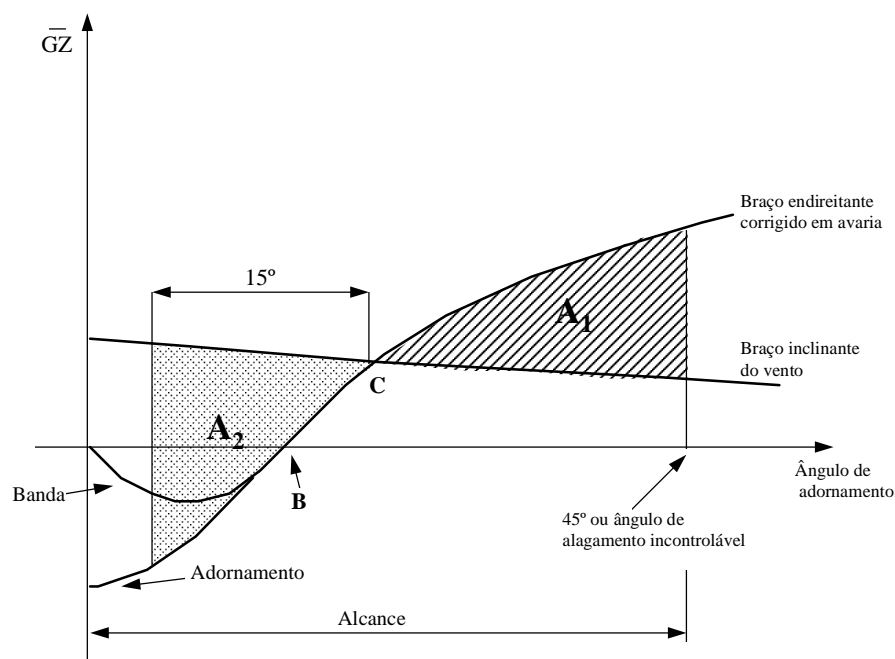


Fig. C.9 - Curva de braço endireitante e inclinante devido a avaria e vento pelo través.

ANEXO D

Cálculos de estabilidade (Corvetas, navios da classe D.Carlos I e N.R.P “Sagres”)

ANEXO D - Cálculos de estabilidade (Corvetas, navios da classe D.Carlos I e N.R.P “Sagres”)

Excertos das folhas de cálculo efectuadas:

Corvetas:

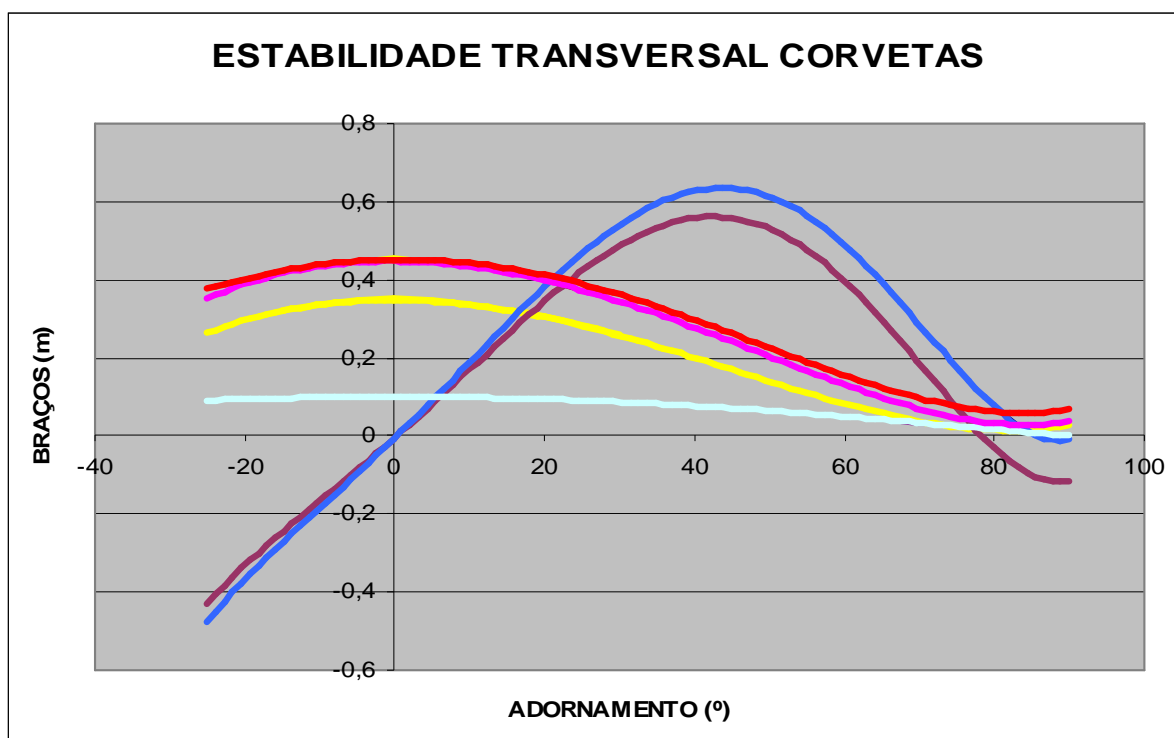
Cálculos de Estabilidade (navio carregado) -EMBARQUE DE PESOS

EMBARQUE DE PESOS PARQUE HELI (mediania)

CONDIÇÃO NAVIO CARREGADO (KG=4,17m)



ITDINAV 802(A) - cap.: 4 e 5



Critérios estabilidade

Área 0-30°: 7,444091482

Área 0-40°: 11,61853953

Área 30-40°: 4,174448053

GZ máximo: 0,580926977

Âng. GZ máx.: 45°

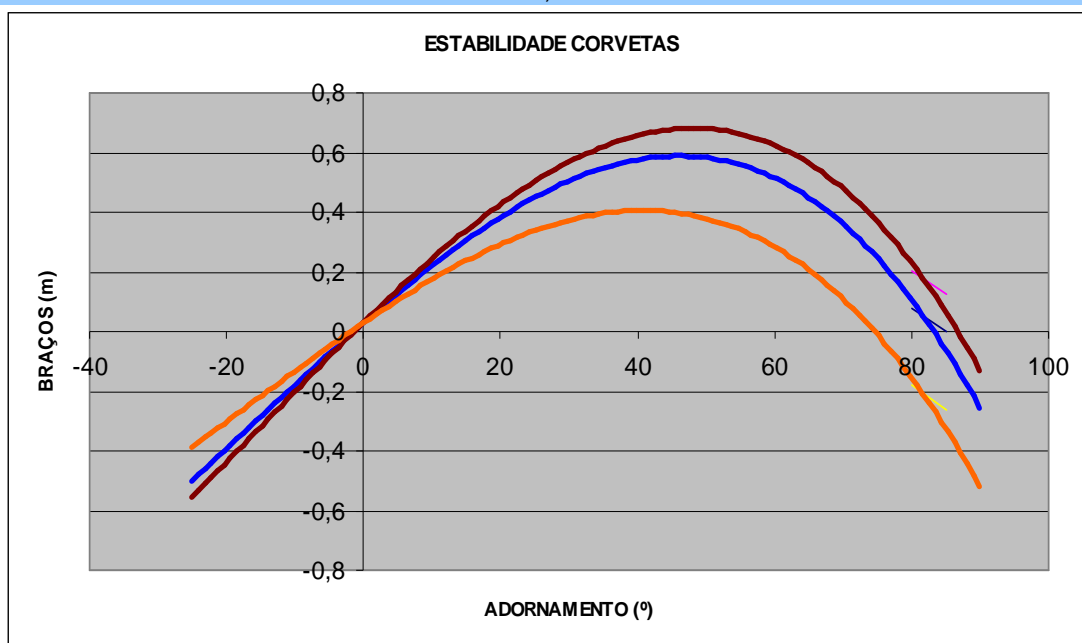
θ (rad)	$\theta(^{\circ})$	GZ INICIAL (m)	GZ FINAL (m)	BRAÇO LIMITE(m)	BRAÇO VENTO SEVERO: 100' (m)	BRAÇO ONDUL.(m) (2,5 m e 8,5s)	EFEITO VENTO + ONDUL. (m)
-0,436	-25						
-0,349	-20	-0,37	-0,333249			0,094	
-0,262	-15			0,419	0,32	0,097	0,417
-0,174	-10	-0,18	-0,161342	0,44	0,335	0,098	0,433
-0,087	-5			0,45	0,345	0,099	0,444
0,000	0	0	0	0,46	0,35	0,100	0,450
0,087	5			0,45	0,345	0,099	0,444
0,174	10	0,18	0,161342	0,44	0,335	0,098	0,433
0,262	15			0,419	0,32	0,097	0,417
0,349	20	0,37	0,333249	0,41	0,305	0,094	0,399
0,436	25			0,39	0,28	0,090	0,370
0,523	30	0,55	0,496273	0,37	0,26	0,087	0,347
0,611	35					0,082	
0,698	40	0,65	0,580927	0,3	0,2	0,077	0,277
0,785	45					0,071	
0,872	50	0,6	0,517678	0,23	0,14	0,064	0,204
0,959	55					0,058	
1,047	60	0,47	0,376927	0,145	0,08	0,050	0,130
1,134	65					0,043	
1,221	70	0,3	0,199002	0,1	0,04	0,030	0,070
1,308	75					0,026	
1,396	80	0,08	-0,025857		0,015	0,018	0,033
1,483	85	0	-0,107088			0,009	
1,570	90					0,000	

Cálculos de Estabilidade -ALAGAMENTOS ESPAÇOS MAQ`S

CONDIÇÃO NAVIO CARREGADO (KG=4,17m)



CONDIÇÃO INICIAL: NAVIO CARREGADO (KG=4,17m)			
Imersão AV	3,2	m	
Imersão AR	3,42	m	
Imersão média	3,31	m	
Deslocamento	1353,29	ton	
Altura Metac. Inicial (GMi)	1,015	m	
Alagamento casa da Maq. PP	0	Altura água	0 m
Alagamento casa GE`s	1	Altura água	4 m
Massa de água embarcada	240,4999	m3	
Deslocamento final	1593,79	ton	
Alteração c.g. navio(s/esp.liquidos)	0,126754	m	
Alteração c.g. navio(c/esp.liquidos)	0,392371	m	
Altura Metac. final	0,749383	m	



Critérios estabilidade

Área 0-30°: 6,25879

Área 0-40°: 9,58673

Área 30-40°: 3,32795

GZ máximo: 0,47934

Âng. GZ máx.: 45°

θ (rad)	$\theta(^{\circ})$	GZ INICIAL (m)	GZ S/ESP.LIQUIDOS (m)	GZ C/ESP.LIQUIDOS (m)
-0,436	-25			
-0,349	-20	-0,37	-0,413344621	-0,279170051
-0,262	-15			
-0,174	-10	-0,18	-0,201944096	-0,134015491
-0,087	-5			
0,000	0	0	0	0
0,087	5			
0,174	10	0,18	0,201999578	0,133899227
0,262	15			
0,349	20	0,37	0,413331386	0,279197786
0,436	25			
0,523	30	0,55	0,613347923	0,417252534
0,611	35			
0,698	40	0,65	0,731441612	0,479336669
0,785	45			
0,872	50	0,6	0,69706324	0,39660108
0,959	55			
1,047	60	0,47	0,579738633	0,240039416
1,134	65			
1,221	70	0,3	0,419083044	0,050457923
1,308	75			
1,396	80	0,08	0,204812836	-0,181549027
1,483	85	0	0,126263445	-0,264588822
1,570	90			

D. Carlos I:

Cálculos de Estabilidade Intacta (navio carregado)

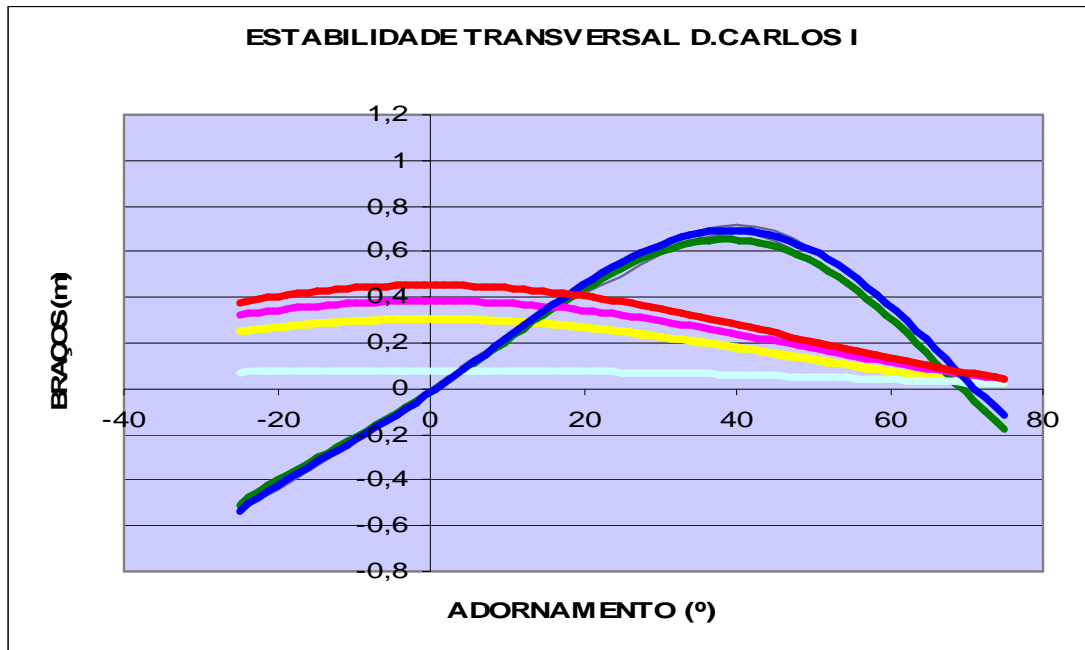
EMBARQUE DE PESOS TOLDA (mediania)

CONDIÇÃO NAVIO CARREGADO (KG=5,44m)



ITDINAV 802(A) - cap.: 6 e 7

CONDIÇÃO NAVIO CARREGADO (KGi=5,44m)			Vento:
calado AV	4	m	
calado AR	4,8	m	
Imersão média	4,40	m	
Deslocamento	2159,42	ton	
Altura c. grav. inicial(KGi)	5,44	m	
Período de adorn. inicial (Ti)	9,6	s	Hcp (m)= 7,08
Alt. Metac. Inicial (GMi)	1,2	m	A (m^2)= 567,7
Raio inicial giração inercial (Ki)	5,24489	m	
Momento inércia inicial	59403,3	Kg.m^2	0,304469839
Peso a embarcar na tolda	50	ton	
Altura c.g. Peso a embarcar	1,5	m	
Velocidade do vento	80	nós	
Momento inércia final	61153,1	Kg.m^2	
Alt. centro gravidade navio	0,06201	m	
Deslocamento final	2209,42	ton	
Período de adorn. final (Tf)	9,88838	s	
Alt. Metac. final (GMf)	1,13799	m	
Altura c. grav. final (KGf)	5,50		
Raio final giração inercial (Kf)	5,26102	m	



Verif. Crit. estabilidade:

1- Área 0-30°: 8,83515971

2- Área 0-40°: 13,6031869

3- Área 30-40°: 4,76802717

4- GZ máximo: 0,68015934

6- GM final: 1,137992785

7- Ef. dinâm. (A1 > 1,4A2): 1

θ (rad)	$\theta(^{\circ})$	GZ INICIAL (m)	GZ FINAL (m)	BRAÇO VENTO (m)	BRAÇO ONDUL. (m) (4 m e 8,5s)	EFEITO V.+ OND. (m)	VALORES LIMITE (m)
-0,436	-25	-0,52	0,49381	0,2501671	0,072515854	0,32268298	0,38
-0,349	-20	-0,44	-0,4188	0,2688665	0,075177211	0,344043732	0,405
-0,262	-15	-0,34	0,32394	0,2840437	0,077269911	0,361313587	0,426
-0,174	-10	-0,23	0,21927	0,2953444	0,078792012	0,374136378	0,442
-0,087	-5	-0,119	0,11361	0,3021711	0,079697431	0,381868547	0,451
0,000	0	0	0	0,3044698	0,08	0,384469839	0,454
0,087	5	0,119	0,1136	0,3021594	0,079695884	0,381855272	0,451

0,174	10	0,23	0,21924	0,2952982	0,078785849	0,374084011	0,442
0,262	15	0,34	0,32396	0,2840944	0,077276813	0,361371241	0,426
0,349	20	0,44	0,4188	0,2688883	0,07518025	0,34406851	0,406
0,436	25	0,52	0,49381	0,2501412	0,0725121	0,322653323	0,38
0,523	30	0,62	0,58901	0,2284224	0,069292648	0,297715008	0,35
0,611	35	0,69	0,65445	0,2043909	0,065546371	0,269937292	0,317
0,698	40	0,72	0,68016	0,1787764	0,061301751	0,240078103	0,281
0,785	45	0,69	0,64617	0,1523561	0,056591062	0,20894721	0,244
0,872	50	0,6	0,55252	0,1259323	0,051450116	0,177382382	0,206
0,959	55	0,49	0,43922	0,1003068	0,045918	0,146224768	0,169
1,047	60	0,35	0,29632	0,0762575	0,040036775	0,116294261	0,133
1,134	65	0,2	0,14382	0,0545144	0,033851155	0,088365559	0,1
1,221	70	0,05	0,00825	0,0357375	0,027408167	0,063145678	0,07
1,308	75			0,0204968	0,020756799	0,04125355	0,046

D,CARLOS I

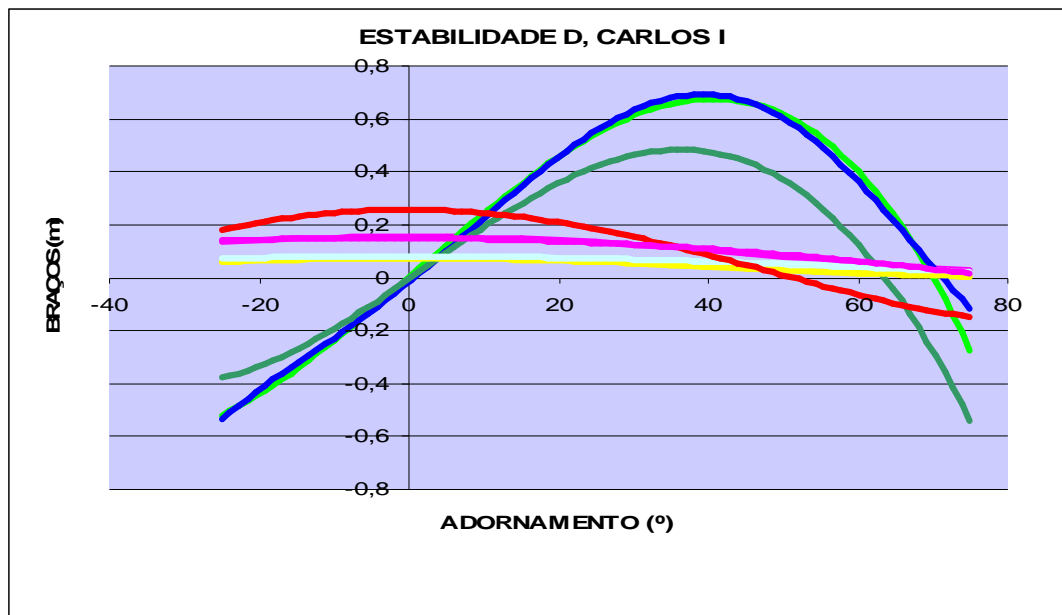
Cálculos de Estabilidade em avaria -ALAGAMENTO casa GE`s e Lab. Aq. Dados

CONDIÇÃO NAVIO CARREGADO
(KG=5,44m)



CONDIÇÃO INICIAL: NAVIO CARREGADO (KGi=5,44m)							
calado AV	4	m					
calado AR	4,8	m					
Imersão média inicial	4,40	m					
Deslocamento	2159,42	ton					
Altura c. grav. inicial(KGi)	5,44	m					
Altura Metac. Inicial (GMi)	1,2	m					
Alag. Casa GE`s	1	Alt. ág.	0,5	m	Esp.liq. ?.	0	Alt. C.g. 0,1 m
Alag. lab. Aq. Dados	1	Alt. ág.	0,5	m	Esp.liq. ?.	1	Alt. C.g. 0,09 m
Vol. água embarcada	84,755	m3					
Deslocamento final	2246,29	ton					

Alt. c.g. navio(s/esp.liq.)	0,0048 m
Alt. c.g. navio(c/esp.liq.)	0,3108 m
Altura Metac. final	0,894 m
Altura c. grav. final (KGf)	5,75 m
Imersão média final	4,5199 m
Velocidade do vento	40 nós



Verificação crit. Estabilidade:

1- Área 0-30°: 7,0057148

2- Área 0-40°: 10,467216

3- Área 30-40°: 3,461501

4- GZ máximo: 0,5233608

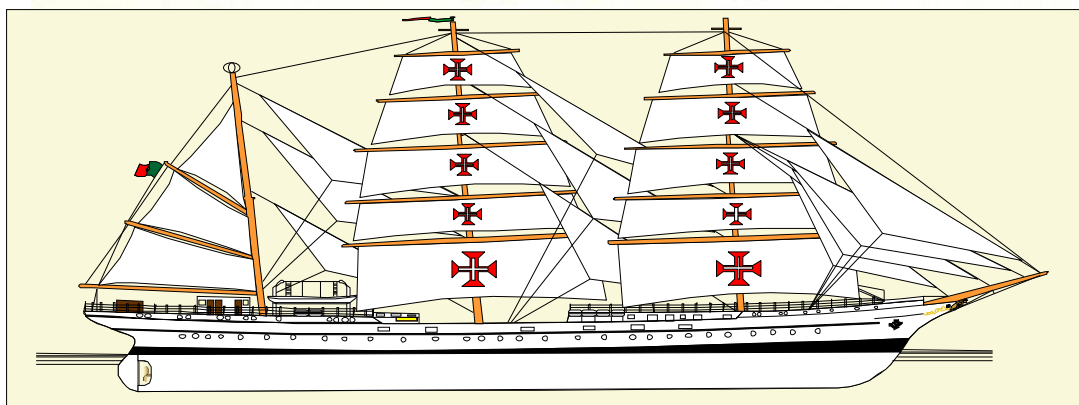
6- GM final: 0,89395459

θ (rad)	$\theta(^{\circ})$	GZ INICIAL (m)	GZ S/ESP.LIQ. (m)	GZ C/ESP.LIQ. (m)	BRAÇO VENTO (m)	BRAÇO ONDUL.(m) (4 m e 8,5s)	EFEITO V.+ OND. (m)	VALORES LIMITE (m)
-0,436	-25	-0,52	0,52201427	-0,390752	0,060511	0,072515854	0,133027233	0,1833608

MIMIQ 2002/2004 – “ Sistema de Avaliação da Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real “

-0,349	-20	-0,44	0,44163099	-0,335345	0,065034	0,075177211	0,14021167	0,2083608
-0,262	-15	-0,34	0,34123538	-0,26073	0,068706	0,077269911	0,145975478	0,2293608
-0,174	-10	-0,23	0,23082572	-0,177016	0,071439	0,078792012	0,150231034	0,2453608
-0,087	-5	-0,119	0,11941443	-0,092408	0,07309	0,079697431	0,152787732	0,2543608
0,000	0	0	0	0	0,073646	0,08	0,153646326	0,2573608
0,087	5	0,119	0,11941549	0,0923399	0,073087	0,079695884	0,152783349	0,2543608
0,174	10	0,23	0,23082781	0,1768824	0,071428	0,078785849	0,150213694	0,2453608
0,262	15	0,34	0,34123384	0,2608289	0,068718	0,077276813	0,145994657	0,2293608
0,349	20	0,44	0,4416305	0,3353772	0,06504	0,07518025	0,140219968	0,2093608
0,436	25	0,52	0,52201475	0,390721	0,060505	0,0725121	0,133017213	0,1833608
0,523	30	0,62	0,62238369	0,4670477	0,055252	0,069292648	0,124544319	0,1533608
0,611	35	0,69	0,6927345	0,5145372	0,049439	0,065546371	0,114985226	0,1203608
0,698	40	0,72	0,72306453	0,5233608	0,043243	0,061301751	0,104544857	0,0843608
0,785	45	0,69	0,69337125	0,4736794	0,036852	0,056591062	0,093443548	0,0473608
0,872	50	0,6	0,60365235	0,3656427	0,030461	0,051450116	0,081911092	0,0093608
0,959	55	0,49	0,49390567	0,2393877	0,024263	0,045918	0,070180584	0,0276392
1,047	60	0,35	0,3541293	0,0850382	0,018445	0,040036775	0,058482226	0,0636392
1,134	65	0,2	0,20432154	-0,077297	0,013186	0,033851155	0,047037307	0,0966392
1,221	70	0,05	0,05448092	-0,237524	0,008644	0,027408167	0,036052493	0,1266392
1,308	75				0,004958	0,020756799	0,025714631	

N.R.P. SAGRES:

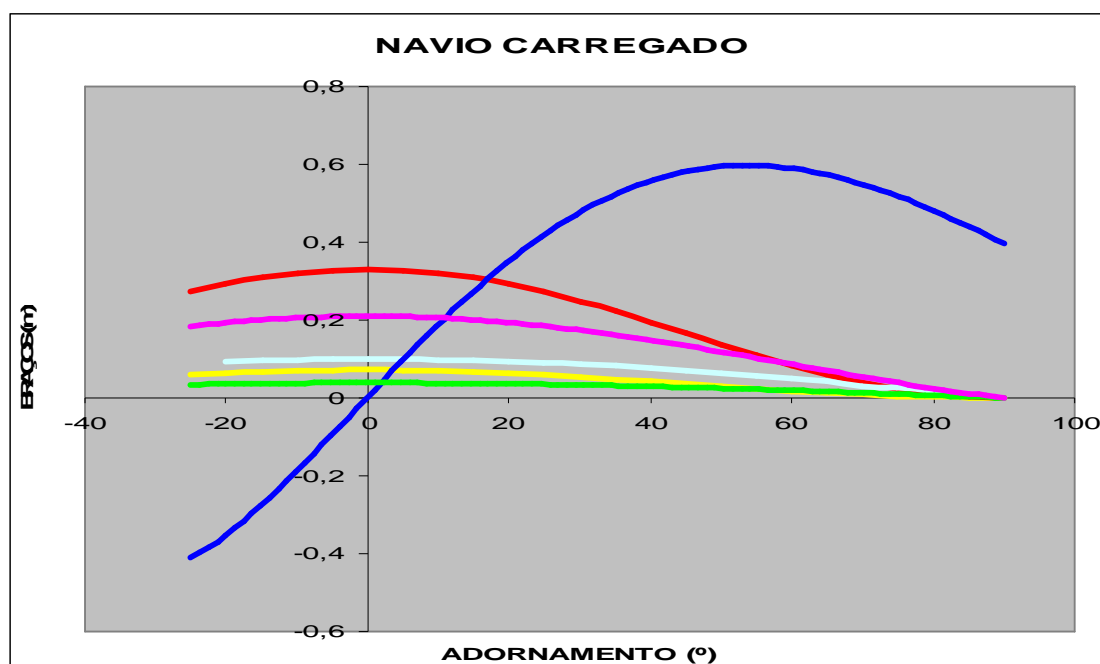


Cálculo de Estabilidade

Entrada de Dados		
Vento no anemómetro (Vi)	24	nós
Marcação do vento (Mv)	75	graus
Componente transversal do vento (Vt)	23,19	nós
Componente longitudinal do vento (VI)	6,19	nós
Cota do anemómetro	45,1	m
Imersão AV	4,35	m
Imersão AR	5,22	m
Imersão média	4,79	m
Deslocamento	1896,88	ton
Vento no centro da vela (Vf)		

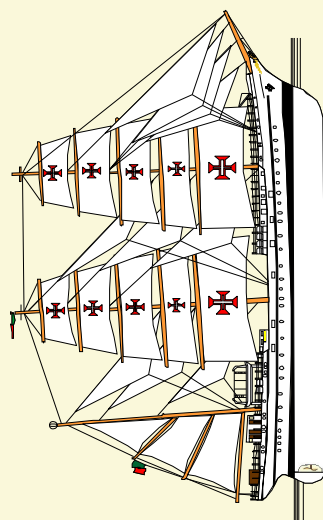
VELAS	Área plana velas PL 2000	Zv m à L água	Área exposta 6 QQ	Vf	(Vf)2*Av m2	C/ ou S/ vela
Grande	200,5	11,55	185,2	8,37	12962,09	1
Traquete	182,8	11,40	168,9	8,28	11580,76	1
Gávea Baixa	104,5	19,25	96,5	12,43	14912,22	1
Velacho Baixo	105,9	19,25	97,8	12,43	15112,00	1
Gávea Alta	105,6	25,40	97,6	15,41	23158,72	1
Velacho Alto	105,6	25,35	97,6	15,38	23088,10	1
Joanete Grande	106,1	32,85	98,0	18,81	34665,99	1
Joanete Proa	106,1	32,75	98,0	18,76	34502,56	1
Sobre Grande	70,8	39,85	65,4	21,84	31207,26	1
Sobre Proa	70,8	39,85	65,4	21,84	31207,26	1
TOTAL PANO REDONDO	1.158,7		1.070,5			
Vela de Estai	50,9	13,40	50,9	9,39	4484,08	1
Bujarrona de Dentro	58,3	14,70	58,3	10,08	5928,62	1
Bujarrona de Fora	52,3	16,30	52,3	10,92	6242,17	1
Giba	84,9	18,05	84,9	11,82	11868,35	1
Estai da Gávea	68,9	14,75	68,9	10,11	7043,52	1

Estai do Joanete	87,1	22,60	87,1	14,07	17251,60	1
Estai do Galope do Grande	47,4	28,80	47,4	16,98	13670,35	1
Estai da Mezena	56,1	12,40	56,1	8,84	4382,38	1
Estai do Gave-Tope	71,6	21,50	71,6	13,54	13126,10	1
Estai do Galope do Gave-Tope	48,0	26,80	48,0	16,06	12382,07	1
Mezena Baixa	82,6	12,20	82,6	8,73	6291,89	1
Mezena Alta	61,1	19,45	61,1	12,53	9589,80	1
Gave-Tope	43,1	28,00	43,1	16,62	11899,13	1
TOTAL PANO LATINO	812,3		812,3			
OBRAS MORTAS e SUPEREST.	564,56	3,109	564,6	3,03	5166,72	1
ÁREA TOTAL EXPOSTA AO VENTO	1.971,0		1.882,8		356557,03	

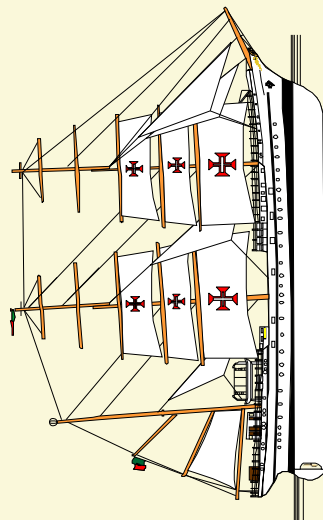


θ (rad)	$\theta(^{\circ})$	BI= Brl* $\cos^2(\theta)$	GZ(m)	Braço Limite (Carregado)	Efeito do LEME	Efeito Vento + Leme + Ondul.	Efeito da Ondulação
-0,436	-25	0,058938293		0,2719			
-0,349	-20	0,063343789	-0,356	0,2922	0,036	0,193	0,094
-0,262	-15	0,066919462		0,3087			0,097
-0,174	-10	0,069581855	-0,174	0,3209	0,038	0,206	0,098
-0,087	-5	0,071190208		0,3283			0,099
0,000	0	0,071731777	0	0,3309	0,039	0,211	0,100
0,087	5	0,071187445		0,3283			0,099
0,174	10	0,06957097	0,174	0,3209	0,038	0,206	0,098
0,262	15	0,066931418		0,3087			0,097
0,349	20	0,063348911	0,356	0,2922	0,036	0,193	0,094
0,436	25	0,05893219		0,2719			0,090
0,523	30	0,05381532	0,483	0,2482	0,033	0,174	0,087
0,611	35	0,048153617		0,2221			0,082
0,698	40	0,042118935	0,566	0,1943	0,03	0,149	0,077
0,785	45	0,03589445		0,1655			0,071
0,872	50	0,029669097	0,594	0,1368	0,025	0,119	0,064
0,959	55	0,023631841		0,1089			0,058
1,047	60	0,017965934	0,583	0,083	0,019	0,087	0,050
1,134	65	0,012843358		0,06			0,043
1,221	70	0,008419603	0,537	0,0389	0,013	0,051	0,030
1,308	75	0,004828946		0,0223			0,026
1,396	80	0,002180378	0,5	0,01	0,007	0,027	0,018
1,483	85	0,000554291		0,00256			0,009
1,570	90	4,54877E-08	0,391	0	0	0,000	0,000

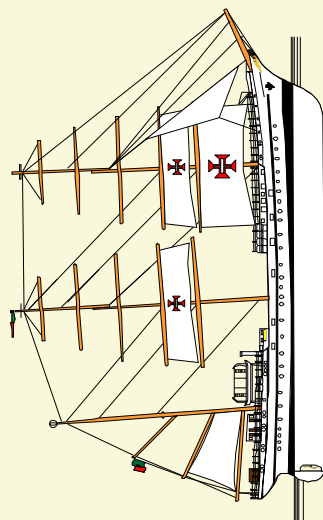
N.R.P. “SAGRES” Quadro de Estabilidade Dinâmica



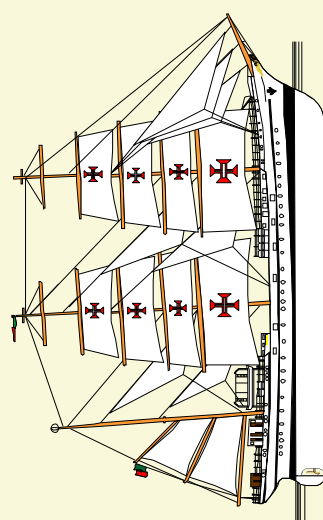
Área vélica exposta: 1528,5 m²
Vento relativo máximo: 38 nós



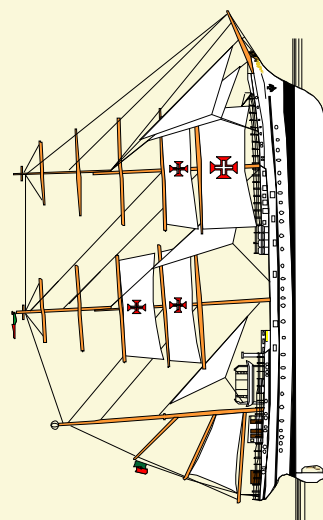
Área vélica exposta: 1090,4 m²
Vento relativo máximo: 46 nós



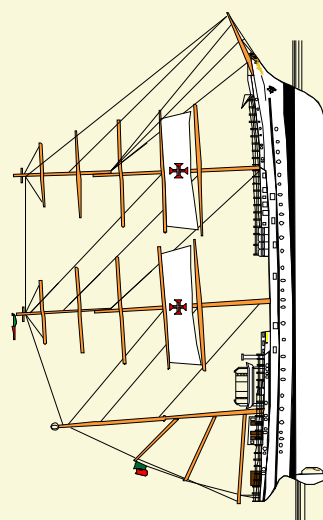
Área vélica exposta: 498,7 m²
Vento relativo máximo: 58 nós



Área vélica exposta: 1528,5 m²
Vento relativo máximo: 38 nós



Área vélica exposta: 777,6 m²
Vento relativo máximo: 50 nós



Área vélica exposta: 194,3 m²
Vento relativo máximo: 68 nós

Condição carregado
Vérgas a 60°
Ângulo de adreçamento máximo 18°